

В.С. Собчук

**ГРОЗОЗАХИСТ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ
КОМПЛЕКСІВ**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. С. Собчук

ГРОЗОЗАХИСТ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

Навчальний посібник

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як навчальний посібник для студентів бакалаврського напрямку 6.0906 – “Електротехніка”. Протокол № 9 від 29 квітня 2004 р.

Вінниця ВНТУ 2005

Рецензенти:

А. О. Новиков, доктор технічних наук, професор
П. Д. Лежнюк, доктор технічних наук, професор
В. І. Нагул, кандидат технічних наук, доцент

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

Собчук В. С.

С 55 Грозозахист електротехнічних комплексів. Навчальний посібник. -
Вінниця: ВНТУ, 2005. – 111с.

В посібнику розглянуті параметри блискавки – джерела грозових перенапруг на основі принципу вибіркового ураження блискавкою об'єктів на землі, наведені сучасні методики розрахунків пристроїв грозозахисту електротехнічних комплексів від прямих ударів блискавки і її вторинних дій. Посібник розроблений у відповідності до плану кафедри та програми дисципліни “Техніка та електрофізика високих напруг”.

УДК 621.315

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1. РОЗРЯД БЛИСКАВКИ ЯК ДЖЕРЕЛО ГРОЗОВИХ ПЕРЕНАПРУГ.....	5
1.1. Розвиток розряду блискавки.....	5
1.2. Параметри блискавки.....	11
1.3. Атмосферні перенапруги.....	14
Контрольні запитання.....	18
РОЗДІЛ 2. ГРОЗОСТІЙКІСТЬ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ.....	19
2.1. Критерії грозостійкості.....	19
2.2. Удар блискавки в верхівку опори ЛЕП.....	21
2.3. Удар блискавки в провід ЛЕП.....	22
2.4. Удар блискавки в трос в середині прогону.....	23
2.5. Індукована перенапруга на провіді при ударі блискавки в опору.....	23
2.6. Індуковані напруги при ударі блискавки в землю поблизу ЛЕП.....	26
2.7. Грозостійкість ліній з тросом.....	31
2.8. Грозостійкість ліній на металевих опорах без тросів.....	38
2.9. Грозостійкість ліній на дерев'яних опорах без тросів.....	40
2.10. Грозостійкість ділянок ліній на дерев'яних опорах з тросом.....	43
2.11. Грозостійкість ліній 10 кВ на дерев'яних опорах.....	44
Контрольні запитання.....	46
РОЗДІЛ 3. ДЕФОРМАЦІЯ І ЗГАСАННЯ ХВИЛЬ ПЕРЕНАПРУГИ НА ПІДХОДАХ ДО ПІДСТАНЦІЙ.....	47
3.1. Деформація фронту хвиль внаслідок опору землі.....	49
3.2. Згасання і спотворення хвиль перенапруги при русі вздовж повітряної лінії від імпульсної корони.....	52
3.3. Коефіцієнт зв'язку і вплив на нього імпульсної корони.....	58
Контрольні запитання.....	62
РОЗДІЛ 4. ГРОЗОЗАХИСТ ПІДСТАНЦІЙ ВІД ХВИЛЬ, ЩО НАБІГАЮТЬ З ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ.....	63
4.1. Обмеження хвилі перенапруги, що набігає з лінії, вентиляним розрядником.....	64
4.2. Перепад напруги між вентиляним розрядником і трансформатором.....	68
4.3. Параметри хвиль, що набігають на підстанцію з лінії.....	75
4.4. Нормальна схема захисту підстанцій від набігаючих хвиль.....	77
4.5. Оцінка грозостійкості підстанції.....	80
4.6. Захист розщепленої нейтралі трансформаторів.....	84
4.7. Особливості захисту підстанцій з автотрансформаторами.....	87

4.8. Загальні міркування про грозозахист підстанцій.....	88
Контрольні запитання.....	90
РОЗДІЛ 5. ГРОЗОЗАХИСТ ОБЕРТОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ	
МАШИН.....	91
5.1. Захист виткової ізоляції.....	93
5.2. Захист нейтралі.....	94
5.3. Розрахунок схеми захисту з повітряним підходом.....	94
5.4. Роль кабельних вставок у схемах грозозахисту машин.....	98
5.5. Захист обертових машин від індукованих перенапруг.....	101
5.6. Схеми захисту генераторів і двигунів великої і середньої потужності від прямих ударів блискавки у лінію.....	103
Контрольні запитання.....	108
ЛІТЕРАТУРА.....	109
Перелік умовних скорочень.....	110

РОЗДІЛ 1. РОЗРЯД БЛИСКАВКИ ЯК ДЖЕРЕЛО ГРОЗОВИХ ПЕРЕНАПРУГ

1.1. Розвиток розряду блискавки

Гроза і блискавка – величні явища природи – цікавлять людство з часів глибокої давнини і донині та, незважаючи на пильну увагу дослідників, не вивчені цілком. До вісімнадцятого сторіччя всі знання обмежувались здогадками і малоймовірними припущеннями, хоча вже в древньому Єгипті розуміли, що від грози потрібно захищати високі будинки, і жерці застосовували щогли, оббиті мідними листами для «викрадення небесного вогню». Наукове вивчення гроз почалося з робіт Франкліна, Ломоносова, які дали перші матеріалістичні пояснення утворення в хмарах електричних зарядів, і петербурзького академіка Ріхмана, що загинув від блискавки під час одного з дослідів, і особливо посилюлося в останні десятиліття. Будівництво високовольтних ліній електропередач і розвиток радіозв'язку стимулювали вивчення грозових розрядів. У рйони з великою грозовою інтенсивністю знаряджались спеціальні експедиції. Ще перед другою світовою війною за допомогою найпростіших пристроїв були проведені значні вимірювання струмів блискавки. Пізніше для вивчення виникнення і механізму розряду блискавки почали застосовувати методи швидкісного фотографування (СФР), осцилографування і радіолокації.

У зв'язку з розвитком високовольтних ЛЕП і авіації знадобилися серйозні дослідження, зокрема, що стосуються метеорологічного характеру грозових хмар і спрямовані на вивчення грозової хмари як джерела блискавки. Дуже цікаві результати дали дослідження в США з літаків, що проходять через грозові хмари на різних висотах (вимірювання напруженостей електричного поля всередині грозових хмар), і наземні вимірювання електричного поля і загального заряду блискавки, що стікає в землю.

За сучасними поглядами грозова хмара в нижніх прошарках (рис. 1.1.1) має переважно негативні заряди, а у верхніх прошарках - позитивні заряди, причому розподіл зарядів нерівномірний. Негативні заряди звичайно розміщуються в окремих, ізольованих один від одного об'ємах, розташованих по вертикалі. В нижніх прошарках хмари також може виникати скупчення позитивного об'ємного заряду, що часто, збільшує напруженість в області скупчення негативних зарядів і відіграє роль ініціатора розряду. Деяка частина позитивного об'ємного заряду може бути розташована також під хмарою. Оскільки в грозовій хмарі є декілька скупчень об'ємного заряду, то розряд блискавки звичайно буває багатократним, в середньому складається з

трьох компонентів, хоча іноді число компонентів може досягати навіть 10-20.

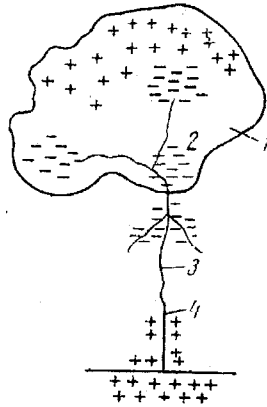


Рис.1.1.1. Розподілення зарядів в грозовій хмарі і розвиток розряду блискавки:

1 – грозова хмара; 2 – скупчення об'ємного заряду; 3 – канал лідера; 4 – канал зворотного (головного) розряду

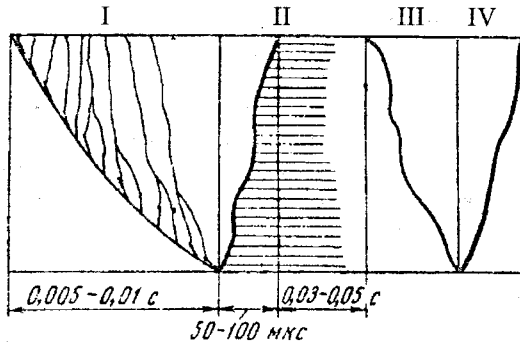


Рис.1.1.2. Фоторозгортка розряду блискавки:

I – ступеневий лідер; II – головний розряд; III – стрілоподібний лідер; IV – другий головний розряд

Кожна компонента розряду блискавки складається з лідерного і головного розрядів.

Дослідження за допомогою швидкісних фотокамер показують, що лідерний розряд розвивається ступінчасто. Спочатку від скупчення негативних об'ємних зарядів, де напруженість досягає критичної величини 25 - 30 кВ/см (у середньому напруженість поля хмара-земля

рідко перевищує 1 кВ/см), вниз до землі поширюється лідер-пілот із швидкістю $1,5 \cdot 10^7$ см/с, а за ним періодично виникають «сходинки».

Швидкість просування шаблів дорівнює $5 \cdot 10^8$ см/с, час просування шабля біля 1 мкс. Навколо каналу лідера утворюється коронний чохол («пряма» корона), що являє собою зону попередньої іонізації. Корона розвивається у вигляді окремих ниток, а перетворення однієї з ниток у канал провідної плазми створює шабель лідера, що супроводжується яскравим спалахом, який добре фіксується на фоторозгортці (рис. 1.1.2). Одночасно збільшується свічіння всього каналу.

Найбільш ймовірною причиною утворення шабля лідера можна вважати збільшення градієнта потенціалу на кінці лідера, при збільшенні розмірів області попередньої іонізації і при зростанні частки напруги, що припадає на нитку корони. Перед самою головою лідера виникає невеличка перехідна зона з градієнтами, значно більшими критичного, що і створює умови для інтенсивної іонізації повітря уздовж однієї з ниток коронного чохла. Швидкість лідера порівняно невелика, тому що дуже різна щільність іонізованих часток до і після перехідної зони. Лідер має надлишковий заряд того ж знака, що знак об'ємного скупчення, звідки він починає розвиток. Розподілений уздовж лідера надлишковий заряд зсувається в зону іонізації, причому це відбувається поступово, в міру розвитку шабля. У першому наближенні можна вважати, що до моменту остаточного розвитку шабля область іонізації можна уявити клинчастої форми.

Стікання з хмари надлишкового негативного заряду створює невеличкий струм лідера, який змінюється повільно. Напрямок удару блискавки визначено або рельєфом місцевості або наявністю об'єкта, що височіє. Під впливом поля лідера, що опускається до землі, безпосередньо під грозовою хмарою в землі або на елементах провідного об'єкта індукується заряд. Знак цього заряду протилежний знаку заряду каналу лідера. Напруженість поля є найбільшою уздовж силової лінії, що з'єднує головку лідера і місце найбільшої концентрації зарядів на поверхні землі або об'єкта, і лідер розвивається саме уздовж цієї силової лінії.

При певній відстані головки лідера від землі напруженість поля на проміжку, що залишився між каналом лідера і землею, починає перевищувати критичну, і в цьому проміжку утворюється провідний канал, на формування якого потрібний якийсь час, що залежить від довжини проміжку. Ступінь іонізації утвореного каналу на порядок вищій ступеню іонізації каналу лідера, тому поздовжній градієнт напруги знижується до дуже невеликого, і канал одержує практично потенціал землі. Заряди уздовж лідерного каналу залишаються і, отже, зберігається утворене цими зарядами електричне поле, тому між

каналом, що зародився, і лідером зберігається значна різниця потенціалів. Під дією значних градієнтів поблизу головки лідерного каналу, що майже досягнув землі, виникає інтенсивна іонізація, що приводить до підвищення провідності плазми на декілька порядків. Градієнт у каналі зменшується, а область інтенсивної іонізації переміщається вгору. Утворення каналу високопровідної плазми є головним розрядом, який розвивається від землі до хмари. При головному розряді відбувається перебудова каналу блискавки: поздовжній градієнт зменшується майже до нуля, а надлишковий заряд лідера «нейтралізується». Насправді процес дещо складніший. На поверхні каналу головного розряду, що має потенціал землі, виникає значна радіальна складова НЕР і під її дією – так звана «обернена» корона. Позитивний об'ємний заряд при оберненій короні виноситься на периферію і компенсує поле негативних об'ємних зарядів. Розподіл зарядів і поздовжніх градієнтів у каналі блискавки зображений на рис.1.1.3.

Переміщення зарядів у режимі оберненої корони йде вже по іонізованому проміжку, тому дуже швидко. Розвиток головного (оберненого) розряду визначається тільки хвильовим іонізаційним процесом у перехідній зоні уздовж каналу лідера. Швидкість розвитку головного розряду лежить у межах $0,05 \div 0,5c$ (c – швидкість світла), залишаючись приблизно постійною при поширенні головного розряду догори.

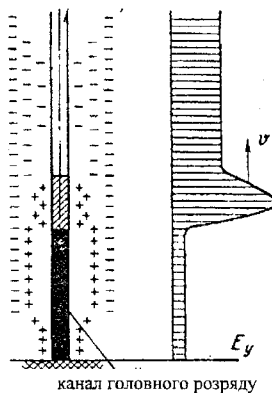


Рис.1.1.3. Розподіл зарядів і поздовжніх градієнтів в каналі блискавки при ударі в землю

Струм головного розряду, який, власне, і називають струмом блискавки, дорівнює:

$$I_M = \sigma_L(h_t)v(h_t), \quad (1.1.1)$$

де $\sigma_L(h_t)$ – лінійна щільність зарядів у лідерному каналі, що змінюється по висоті каналу;

$v(h_t)$ – швидкість головного розряду.

За допомогою цієї формули можна визначити, як змінюється струм блискавки в часі, якщо врахувати, що шлях h по вертикалі

головний розряд проходить за час $t = \int_0^h \frac{dh}{v(h_t)}$ або в першому

наближенні за $t = \frac{h}{v}$.

На рис. 1.1.4 схематично зображено утворення струму блискавки. Довжина останньої сходинки лідерного процесу і відповідна їй довжина фронту струму блискавки підпорядковуються статистичним закономірностям. Результати спільних вимірювань струмів і крутизни струмів блискавки наведені на рис. 1.1.5. З розкиду точок випливає, що крутизна слабо зростає із зростанням амплітуди струму блискавки. Якщо вважати, що швидкість головного розряду в середньому складає $v=0,15$ с, а довжина останнього щабля лідера близько сотні метрів, то довжина фронту струму блискавки складає: $\tau_\phi = \frac{100 \div 150}{0,15 \cdot 300} = 2-3$ мкс. Це, загалом, не суперечить результатам спостережень. На рис. 1.1.5 пунктирна пряма відповідає кореляції дослідних даних, суцільна пряма - довжині фронту 2,5 мкс.

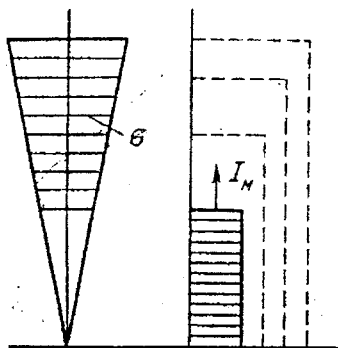


Рис.1.1.4. Розподіл заряду в останній сходинці лідера і утворення струму головної каналної стадії при ударі в землю

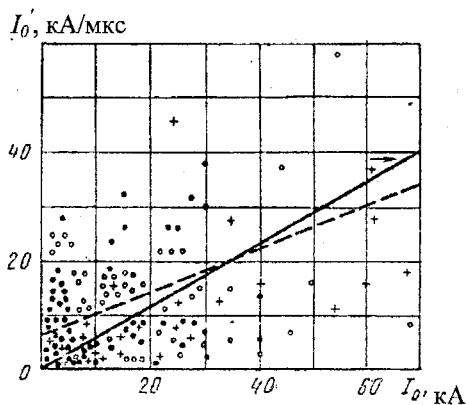


Рис.1.1.5. Статистична залежність струму блискавки від амплітуди

При ударах блискавки в об'єкти, що височать, з останніх розвиваються зустрічні стрімери. Головноканалний процес буде розвиватися не від землі, а в обидві сторони від місця зустрічі лідера, що опускається від хмари, і стрімера із заземленого об'єкта. При висоті об'єктів 20-30 м довжина зустрічного стрімера за розрахунками становить приблизно 40 м. Утворення зустрічного стрімера дещо збільшує довжину фронту струму блискавки. Це пояснюється тим, що поки головний розряд не заповнить канал зустрічного стрімера, опір його великий, і струм, що протікає через заземлений об'єкт, обмежується.

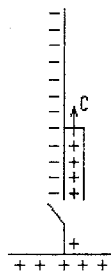


Рис.1.1.6. Розряд вертикального зарядженого проводу на землю (аналогія утворення каналу головного розряду блискавки)

Процес перебудови лідерного каналу при головному розряді можна уподібнити розряду вертикального зарядженого проводу на землю. Як уздовж каналу, так і уздовж проводу поширюється хвиля позитивних зарядів, що знижує потенціал до нуля (рис. 1.1.6). Ця аналогія підказує

найпростішу розрахункову модель блискавки. Заряджений до високого потенціалу лідерний канал при зіткненні із землею перетворюється в провідник, по якому поширюється електромагнітний процес із швидкістю, що наближається до швидкості світла.

Розмір струму в місці удару буде залежати і від хвильового опору каналу блискавки і від опору розтікання струму в землі:

$$I_M = \sigma_{л} v \frac{z_0}{z_0 + R_3} = I_0 \frac{z_0}{z_0 + R_3}, \quad (1.1.2)$$

де Z_0 - хвильовий опір каналу блискавки;

R_3 - опір заземлювача при ударі в заземлений об'єкт або опір розтіканню струму при ударі в землю (опір самозаземлення блискавки).

Опір R_3 знижує струм блискавки, але точно оцінити це важко, тому що наведена розрахункова модель умовна, а величина хвильового опору каналу блискавки відома приблизно. Звичайно порядок Z_0 оцінюють у 200-400 Ом. При таких опорах величина струму в об'єкті мало залежить від R_3 (у межах 10% точності), якщо R_3 у межах 20 - 30 Ом. Об'єкти з опором заземлювача меншим 30 Ом називають «добре заземленими».

При ударах у «ізолювані» об'єкти, такі як провід лінії електропередачі, «заземлений» через свій хвильовий опір, струм блискавки, як впливає з формули (1.1.2), зменшується приблизно вдвічі:

$$I_M = I_0 \frac{z_0}{z_0 + z} \approx \frac{1}{2} I_0. \quad (1.1.3)$$

1.2. Параметри блискавки

Для розрахунків перенапруг необхідно знати амплітуду струму блискавки, форму хвилі або крутизну струму блискавки і швидкість розвитку головноканальної стадії розряду блискавки. Дотепер є дуже велике (більше 10000) число вимірювань струмів блискавки. За результатами вимірювань побудовані криві ймовірності струмів блискавки: абсциса кривої вказує ймовірність струму блискавки, рівної або більшої величини, що вказується ординатою (рис. 1.2.1).

Середня крива ймовірностей струмів блискавки, що рекомендується в нашій країні при розрахунках грозостійкості, визначається за емпіричною формулою:

$$g_i = e^{-\frac{I_0}{26.1}} = 10^{-\frac{I_0}{60}}, \quad (1.2.1)$$

$$\text{або } \lg \vartheta_i = -\frac{I_0}{60},$$

або, якщо ймовірність визначати у відсотках,

$$\lg \vartheta_i (\%) = 2\left(1 - \frac{I_0}{120}\right). \quad (1.2.2)$$

Криві можливостей побудовані для ударів у добре заземлені об'єкти.

Для оцінки можливих величин струму при ударі в погано заземлений або ізольований об'єкт, перед тим, як звертатися до кривої, струм треба перерахувати до умов удару в добре заземлений об'єкт:

$$I_0 = I_M \frac{z_0 + R_3}{z_0}.$$

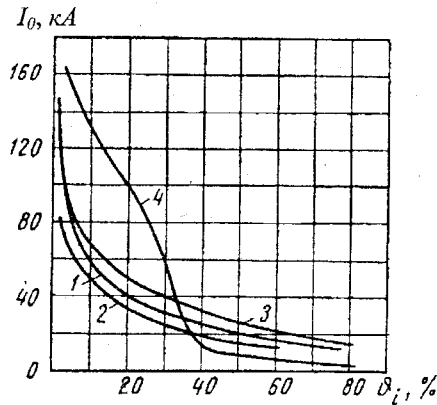


Рис.1.2.1. Криві ймовірності амплітуд струмів:

1 – за рекомендацією керівних вказівок; 2 – американський стандарт; 3 – за даними розрядів в лінію; 4 – за даними розрядів в висотну будівлю

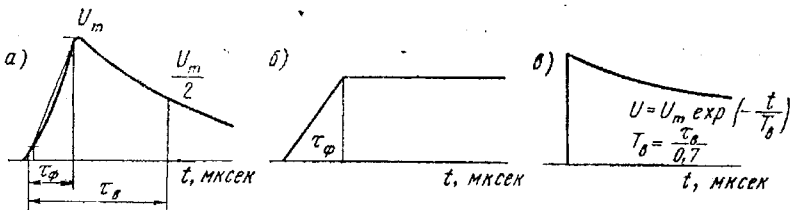


Рис. 1.2.2. Розрахункові хвилі струму блискавки:
а – аперіодична; б – косокутна; в – експоненціальна загасаюча

Емпірична формула (1.2.2) складена для струмів блискавки в рівнинних місцевостях. У гірських місцевостях криві можливих струмів блискавки помітно знижуються, причому це зниження вже істотно при висотах 1,8-2,4 км. Залежність струмів блискавки від висоти пояснюється, напевне, впливом рельєфу місцевості на розвиток лідерної стадії. Цікаво відзначити, що значно знижуються струми і при ударі блискавки в дуже високі об'єкти (хмарочоси, телевізійні щогли, заводські димарі).

Форма кривої струму істотно впливає на результати розрахунків грозостійкості. Дійсні форми кривої струмів блискавки можуть бути різноманітними, що взагалі впливає з формули (1.1.1), тому що розподіл лінійної щільності зарядів у лідерному каналі тільки при найгрубішому наближенні може вважатися рівномірним, а швидкість v також змінюється при просуванні головного розряду до хмари. У загальному вигляді хвиля струму блискавки має форму аперіодичного імпульсу, причому довжина хвилі в середньому приблизно 40 мкс. При розрахунках для моментів на фронті хвилі або у всякому разі протягом часу багато меншому довжини хвилі, частіше усього використовують косокутну хвилю з обмеженою амплітудою (рис. 1.2.2). Середня довжина фронту приблизно складає 2,5 мкс для великих амплітуд струму.

У розрахунках, коли цікавить час $t \gg \tau_{\phi}$ і наявність фронту практично не грає ролі, використовують експоненційну форму хвилі.

Найбільша крутизна струму блискавки становить 50 кА/мкс. Одночасні вимірювання амплітуд струмів блискавки і крутизни малочисельні. Проте непрямыми свідченнями встановлюється деяка тенденція збільшення крутизни зі збільшенням амплітуди.

У розрахунках індукованих перенапруг і електромагнітного поля каналу блискавки дуже істотна величина швидкості розвитку головного розряду. Вичерпних даних також немає. Проте є спроба одержати зв'язок між амплітудою струму і швидкістю головноканалної стадії. Великим амплітудам струмів відповідають і великі швидкості: при струмах 20 кА швидкість $v = 0,15$ с, при струмах у 200 кА швидкість $v = 0,5$ с.

Полярність грозових розрядів у більшості випадків негативна. Цікаво відзначити, що позитивні розряди вражають, в основному, ділянки з високою провідністю землі, наприклад, поклади залізної руди, вологі низинні місця, щільну мережу металевих підземних комунікацій, навіть якщо ці ділянки не знаходяться безпосередньо під грозовою хмарою. І, навпаки, негативні рзряди не обов'язково уражають об'єкти з кращою провідністю, наприклад, блискаковідводи, а можуть влучати в сусідні конструкції з гіршою провідністю й у цьому сенсі є більш небезпечними.

1.3. Атмосферні перенапруги. Електромагнітне поле каналу блискавки

Розряд блискавки супроводжується переміщенням у просторі дуже значних електричних зарядів (у середньому при ударі переноситься заряд порядку 5-10 Кл), він є джерелом сильного електромагнітного поля. У лідерної стадії процесу на об'єктах, розташованих поблизу грозової хмари, індуються заряди знаку, протилежного знаку лідера, що опускається. При головному розряді напруженість електростатичного поля падає майже до нуля, індуквані заряди перестають утримуватися полем й обумовлюють перенапругу, що називається індукованою. Індуквані перенапруги виникають на проводах лінії електропередачі як при ударах блискавки в землю поблизу лінії, так і при ударах безпосередньо в опори або троси лінії.

При ударах безпосередньо в об'єкт струм головного розряду швидко зростає, нейтралізує індуквані заряди і, створюючи падіння напруги в опорі й індуктивності пристрою, що заземлює, заряджає об'єкт до дуже високої напруги того ж знаку, що і заряд хмари. Так виникають перенапруги прямого удару. При розрахунках грозостійкості ліній надвисокої напруги враховуються перенапруги і прямого удару і індукованого.

Методика розрахунку індукованих перенапруг використовує загальні рівняння електромагнітного поля.

Відповідно до цих рівнянь напруженість електричного поля

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{E}_\varphi + \vec{E}_M. \quad (1.3.1)$$

Ця напруженість складається з двох складових: одна визначається зміною електричного поля в просторі і її називають електричною, інша обумовлена зміною магнітного поля і її називають магнітною складовою.

Скалярний і векторний потенціали, як відомо, визначаються інтегралами:

$$\varphi(x, y, z, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{(V)} \frac{q^*}{R} dV, \quad (1.3.2)$$

$$\vec{A}(x, y, z, t) = \frac{\mu}{4\pi} \int_{(V)} \frac{\vec{\delta}^*}{R} dV. \quad (1.3.3)$$

Інтегрування поширюється на весь об'єм, заповнений зарядами з об'ємною щільністю q і струмами провідності із щільністю $\vec{\delta}$. Оскільки процес розряду блискавки відбувається зі швидкостями, близькими до швидкості світла, обов'язково потрібно врахувати «запізнення»,

тобто визначати «запізнілі» скалярний і векторний потенціали: при визначенні потенціалу в момент часу t розміри φ і \vec{A} брати не для t , а для більш раннього часу $t - \frac{R}{c}$, де $\frac{R}{c}$ час проходження сигналу зі швидкістю світла від елементарного об'єму до точки спостереження.

Наближений розрахунок електромагнітного поля зробимо, вважаючи, що канал блискавки перпендикулярний до поверхні землі, а головний розряд розглядається у вигляді поширення догори з постійною швидкістю v прямокутної хвилі зарядів із незмінною щільністю σ , що, іншими словами, еквівалентно хвилі струму блискавки з амплітудою $I_M = \sigma v$ і прямокутним фронтом.

Оскільки поперечні розміри каналу малі в порівнянні з відстанню до точки спостереження, об'ємні інтеграли перетворюються в лінійні, що дуже полегшує визначення потенціалів φ і \vec{A} .

Векторний потенціал \vec{A} збігається з напрямком струму. Оскільки канал розряду спрямований вертикально, то вектор магнітної складового поля також спрямований вертикально.

Електрична складова вектора напруженості поля, що є градієнтом скалярної величини, спрямована під деяким кутом до точки спостереження і буде мати всі просторові складові. Найбільш цікавою є вертикальна складова E_y , тому що потенціал щодо землі визначається саме складовими по осі E_y .

Якщо розраховується напруга на лінії при ударі блискавки десь поблизу, то цікавою є поздовжня складова E_x . Вона обумовлює перехідний процес у лінії, пов'язаний з поділом зарядів на зв'язані і вільні. Після завершення головного розряду блискавки вільні заряди розтікаються в обидві сторони по лінії й утворюють хвилі індукованих перенапруг.

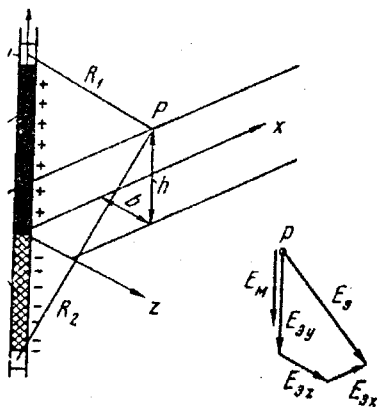


Рис.1.3.1. До розрахунку електромагнітного поля блискавки

Скористаємося схемою рис. 1.3.1 на якій початок координат сполучено з точкою дотику блискавки з землею, вісь x розташована паралельно проводам лінії електропередачі, вісь y спрямована вертикально, а відстань b по осі z – найкоротша відстань від каналу блискавки до лінії. Відлік часу $t=0$ починається з початком головного розряду блискавки. Швидкість головного розряду визначимо через швидкість світла: $v = \beta c$. У момент часу t скалярний потенціал визначається не повною довжиною головного розряду, що розвився до цього моменту $y = vt$, а дещо меншою довжиною y_k , оскільки враховується "запізнення". Розмір y_k визначимо з умови, що $y_k = v(t - \frac{R_k}{c})$, де $\frac{R_k}{c}$ – час проходження сигналу від кінця каналу y_k до точки спостереження.

Беремо інтеграл

$$\varphi = -\frac{\sigma}{4\pi\epsilon} \left\{ \int_0^{y_{k1}} \frac{dy}{R_1} - \int_0^{y_{k2}} \frac{dy}{R_2} \right\} \quad (1.3.4)$$

і в результаті отримаємо

$$\varphi = \frac{\sigma}{4\pi\epsilon} \left[\ln \frac{vt - h + \sqrt{(vt - h)^2 + (1 - \beta^2)(x^2 + b^2)}}{(1 + \beta)(-h + \sqrt{h^2 + x^2 + b^2})} - \ln \frac{vt + h + \sqrt{(vt + h)^2 + (1 - \beta^2)(x^2 + b^2)}}{(1 + \beta)(h + \sqrt{h^2 + x^2 + b^2})} \right]. \quad (1.3.5)$$

Напруженість поля, точніше вертикальна складова напруженості, на висоті $h=0$

$$E_{\varphi} = -\frac{\partial\varphi}{\partial h} \Big|_{h=0} = 60 I_M \left[\frac{1}{\sqrt{(vt)^2 + (1 - \beta^2)(x^2 + b^2)}} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + b^2}} \right]. \quad (1.3.6)$$

Векторний потенціал у точці $x, 0, b$

$$A = \frac{2\mu I_M}{4\pi} \int_0^{y_k} \frac{dy}{R} = \frac{2\mu I_M}{4\pi} \int_0^{v(t - \frac{R}{c})} \frac{dy}{\sqrt{b^2 + x^2 + y^2}} = \frac{2\mu I_M}{4\pi} \ln \frac{vt + \sqrt{(vt)^2 + (1 - \beta^2)(x^2 + b^2)}}{(1 + \beta)\sqrt{x^2 + b^2}}. \quad (1.3.7)$$

Звідси магнітна складова напруженості поля на поверхні землі

$$\begin{aligned} \bar{E}_{m.y} &= -\frac{\partial A}{\partial t} = -\frac{60}{c} I_M \frac{(1 + \beta)\sqrt{x^2 + b^2}}{vt + \sqrt{(vt)^2 + (1 - \beta^2)(x^2 + b^2)}} \left[v + \frac{2v^2 t}{2\sqrt{(vt)^2 + (1 - \beta^2)(x^2 + b^2)}} \right] \cdot \frac{1}{(1 + \beta)\sqrt{x^2 + b^2}} = \\ &= -60 I_M \frac{\beta}{\sqrt{(vt)^2 + (1 - \beta^2)(x^2 + b^2)}}. \end{aligned} \quad (1.3.8)$$

Записуючи формули (1.3.6)-(1.3.8) відмітимо, що

$$R_{1,2} = \sqrt{(y \mp h)^2 + x^2 + b^2},$$

$$y_k = v \left(t - \frac{R_k}{c} \right) = vt - \beta \sqrt{(y \mp h)^2 + x^2 + b^2},$$

$$(y_k - vt)^2 = \beta^2 (y \mp h)^2 + \beta^2 (x^2 + b^2),$$

$$(1 - \beta^2) y_k^2 - 2 y_k (vt \mp \beta^2 h) + [(vt)^2 - \beta^2 h^2 + \beta^2 (x^2 + b^2)] = 0,$$

$$y_{k,2} = \frac{1}{(1 - \beta^2)} \left\{ vt \mp \beta^2 h \pm \sqrt{(vt \mp \beta^2 h)^2 - (1 - \beta^2) [(vt)^2 - \beta^2 h^2 + \beta^2 (x^2 + b^2)]} \right\} =$$

$$= \frac{\beta}{1 - \beta^2} \left[\frac{vt}{\beta} \mp \beta h - \sqrt{(vt \mp h)^2 - (1 - \beta^2)(x^2 + b^2)} \right] \quad (1.3.9)$$

$$\sigma v = I_M \quad i \frac{2\mu c}{4\pi} = \frac{2}{4\pi \epsilon c} = 60 \text{ Ом.}$$

За наведеними формулами побудовані графіки рис. 1.3.2. З них очевидно, що магнітна складова напруженості досить швидко загасає, у той час як електрична складова наближається до своєї межі, обумовленої другим членом рівняння (1.3.8). З тих же графіків видно, як змінюється напруженість поля каналу блискавки зі збільшенням відстані. Обидві складові зменшуються обернено пропорційно відстані, причому з ростом відстані питома вага магнітної складової підвищується. Цікаво, що поле навіть на відстані сотень кілометрів від місця удару зберігає досить значну інтенсивність і тому є джерелом радіоперешкод.

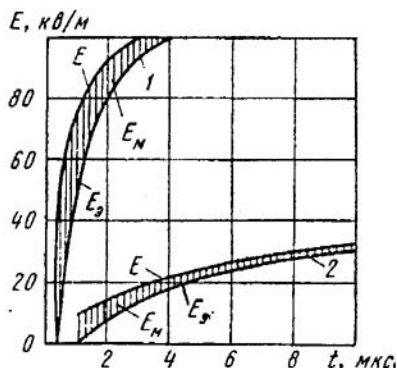


Рис.1.3.2. Вимірювання магнітної і електричної вертикальних складових напруженості поля при розряді блискавки. Швидкість розвитку розряду $\beta = 0,5$; 1,2 – відстань до місця удару дорівнює 100 м; 3 – 300 м

Контрольні запитання

1. Який механізм лідерного розряду?
2. Які параметри блискавки необхідно знати для розрахунку грозових перенапруг?
3. Із яких двох складових утворюється напруженість поля блискавки?

Розділ 2. ГРОЗОСТІЙКІСТЬ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Останні двадцять-тридцять років існувала думка, що головну небезпеку для ліній електропередачі становлять тільки перенапруги після прямого удару блискавки. Тому науково-дослідні роботи концентрувались навколо вимірювань струмів блискавки, вивчення форм хвилі струму і створення спрощених методик розрахунку грозостійкості при прямих ударах. Розглядалися лінії головним чином високих напруг. Методика розрахунку грозостійкості признавалася задовільною, оскільки суттєвих розбіжностей між розрахунковими й експлуатаційними показниками грозостійкості не відзначалося. Вважалося, що лінії високої напруги малочутливі до індукованих перенапруг, тому аналізу останніх великої уваги не приділяли. Залишалось поза вивченням питання про поведінку розподільних ліній низької і середньої напруги, хоча загальна їх довжина значно перевершує довжину ліній високих і надвисоких напруг. Тим часом ці лінії пошкоджувались не тільки при прямих ударах блискавки, але і при ударах по шляху хмара-земля і навіть при ударах між грозовими хмарами.

Проте експлуатація ліній 330-1150 кВ підтвердила недосконалість наближених методик і визнала необхідним більш повне урахування фізичних уявлень про механізм утворення атмосферних перенапруг. Виявилась також необхідність більш глибокого вивчення й урахування в інженерних розрахунках індукованих перенапруг, що важливо для ліній розподільних мереж і для ліній дальніх електропередач 500 кВ і вище; аналізу хвильових процесів при ударах у дуже високі опори; точнішого урахування проривів блискавки поза тросовим захистом.

Розглянемо уточнену методику розрахунку грозостійкості ліній різних класів напруги.

2.1. Критерії грозостійкості

Лінії електропередачі мають велику довжину і найчастіше вражаються ударами блискавки. Атмосферні перенапруги можуть спричинити перекриття лінійної ізоляції і наступний перехід імпульсної іскри в силову дугу короткого замикання, тобто викликати аварійне вимикання лінії. Абсолютно грозостійких ліній немає. В залежності від необхідного ступеня надійності електропередачі система грозозахисних заходів приведе кількість аварійних відключень до деякої розумної межі.

Грозостійкість лінії залежить від її конструкції, зокрема, від рівня ізоляції і інтенсивності грозової діяльності в районі траси. Інтенсивність грозової діяльності оцінюють по питомому числу ударів блискавки і числу грозових годин за рік.

Для України число грозових годин складає приблизно 50-70.

Питома вражуваність складає в середньому 0,067 ударів на квадратний кілометр земної поверхні за одну годину. Повітряна лінія електропередачі збирає удари зі смуги шириною $6h$ (h – середня висота підвішення тросу або верхнього проводу), тому очікуване число уражень лінії довжиною 100 км у районі з 100 г.г. за рік можна визначити за формулою:

$$N_{\text{год}} = 0,067 \cdot 6\bar{h} \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 100 = 4\bar{h}. \quad (2.1.1)$$

Для будь-якого числа грозових годин D і будь-якої довжини лінії l (км), очікуване число прямих ударів блискавки буде:

$$N = 4h \frac{l}{100} \cdot \frac{D}{100}. \quad (2.1.2)$$

Лінію вражають розряди різної сили, тому ймовірність перекриття лінійної ізоляції визначається співвідношенням між струмом блискавки і рівнем грозостійкості ізоляції. З рівнем же ізоляції пов'язана ймовірність переходу імпульсного перекриття в силову дугу η .

Грозостійкість лінії характеризується критичним струмом блискавки і числом грозових вимикань за рік (або оберненим розміром – тривалістю безаварійної роботи лінії).

Під рівнем грозостійкості розуміється найменший струм блискавки, що викликає перекриття ізоляції при прямому ударі в лінію. Ймовірність цього струму може бути визначена за кривими ймовірності струмів блискавки різних амплітуд \mathcal{G} . Отже, при N ударах блискавки в ЛЕП число перекриттів ізоляції буде $N\mathcal{G}_i$, а з них тільки η -частка закінчиться силовою дугою. Звідси очікуване число грозових вимикань лінії:

$$n = N\mathcal{G}_i\eta \quad (2.1.3)$$

і очікуване число років безаварійної роботи (без урахування застосування АПВ):

$$m = \frac{1}{n} = \frac{1}{N\mathcal{G}_i\eta}. \quad (2.1.4)$$

Зазначені критерії грозостійкості дуже приблизно характеризують економічну доцільність прийнятих для даної лінії заходів грозозахисту, оцінюючи лише надійність. Вірніше було б розглядати заходи грозозахисту, виходячи не з вимоги забезпечення більш-менш повної грозостійкості, а з умови мінімуму експлуатаційних витрат, які включають збитки внаслідок недосконалості захисту. Проте цей критерій поки не застосовується через недостатність даних про вартість збитків при вимиканнях.

2.2. Удар блискавки в верхівку опори ЛЕП

При ударі в опору струм блискавки стікає в основному через заземлення самої ураженої опори (рис. 2.2.1). Відгалуження струму в тросі і заземлення сусідніх опор незначне і складає приблизно 15%. Опору можна розглядати як лінію кінцевої довжини h із хвильовим опором $z_{оп}$ і напругу на верхівці визначити методом хвиль, що біжать. Від точки удару блискавки вниз по опорі піде хвиля напруги, яка відіб'ється від опору заземлення з протилежним знаком, потім заломлюючись біля верхівки, знову відбивається і йде до заземлення і т.д.

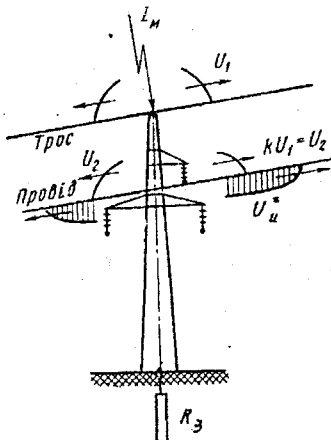


Рис. 2.2.1. До розрахунку перенапруг при ударі в верхівку опори:
 U_1 – перенапруга на тросі; U_2 – хвиля, наведена хвилею U_1 ; U_2^* –
 індукована перенапруга

Хід послідовних відбиттів зручно представити за допомогою характеристичної сітки. Напруга на верхівці опори дорівнює сумі напруг всіх хвиль. Процес відбувається в такий спосіб: струм блискавки поступово проникає до заземлень опор подібно тому, як росте струм в активному опорі, відокремленому від джерела індуктивністю. Така аналогія підказує спрощений метод розрахунку, при якому опора замінюється деякою індуктивністю. Індуктивність опори пов'язана з її хвильовим опором:

$$L_{он} = \frac{z_{он} h}{c},$$

де h – висота опори, м;

$L_{он}$ – індуктивність, мкГн;

c – швидкість електромагнітної хвилі, м/мкс.

Доведено, що для не дуже високих опор цілком припустимо уявити опору зосередженою індуктивністю. Тоді перенапряга на верхівці буде визначатися падінням напруги в заземленні й в індуктивності опори. Максимальна напруга виникає при амплітуді струму блискавки, тобто при $t = \tau_{\phi}$:

$$U_{1\max} = R_3 I_{on} + L_{on} \frac{di_{on}}{dt}. \quad (2.2.1)$$

Якщо поки не враховувати індуктованих блискавкою перенапруг, то на ізоляцію опори лягає напруга:

$$U_{is.} = U_{1\max} - U_{1\max} k = U_{1\max} (1 - k), \quad (2.2.2)$$

де k - коефіцієнт зв'язку між тросом і проводом.

Поняття про індуктивність опори виникає і при іншому підході. Можна розрахувати через векторний потенціал індуктовану напругу на проводі від струму, що протікає по опорі. Вона виявляється пропорційною крутизні струму в опорі і коефіцієнту, який можна назвати індуктивністю опори.

2.3. Удар блискавки в провід ЛЕП

При ударі в провід (рис. 2.3.1), коли лінія не має тросового захисту або при прориві блискавки поза тросом, на проводі і на ізоляції гірлянди виникає напруга

$$U_1 = \frac{I_M}{2} z \geq U_{is.}$$

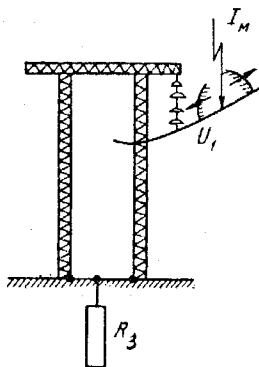


Рис.2.3.1. До розрахунку перенапруг при ударі в провід

Звідси рівень грозостійкості при ударі блискавки в провід

$$I_M = \frac{2U_{із.}}{z}, \quad (2.3.1)$$

або в перерахунку на удар у добре заземлений об'єкт

$$I_0 = \frac{4U_{із.}}{z}. \quad (2.3.2)$$

Наприклад, для лінії 110 кВ із сьома елементами ПС-4,5 у гірлянді (мінімальна розрядна напруга 770 кВ) рівень грозостійкості складе:

$$I_0 = \frac{4 \cdot 770}{400} = 7,7 \text{ кА.}$$

Ймовірність такого струму блискавки дуже велика і практично кожне враження лінії блискавкою буде супроводжуватися перекриттям лінійної ізоляції. Тому лінії на металевих або залізобетонних опорах обов'язково забезпечуються захистом від прямих ударів блискавки, для чого підвішуються заземлені троси з найменшими захисними кутами.

2.4. Удар блискавки в трос в середині прогону

Струм блискавки в цьому випадку розподіляється порівну між сусідніми опорами. Ізоляція опор опиняється в більш сприятливих умовах, ніж при ударі в опору.

В місці удару може виникнути напруга, яка залежить від швидкості наростання струму блискавки, тому що вона визначається індуктивним падінням напруги вздовж тросу. В сучасних лініях практично виключене перекриття з тросу на провід в прогоні або з тросу на землю. Проте при великих струмах блискавки і поганому заземленні опор може відбуватися перекриття лінійної ізоляції на опорі.

2.5. Індукована перенапруга на проводі при ударі блискавки в опору

Приймаємо умови і позначення (рис. 2.5.1), аналогічні зазначеним на рис. 1.3.1.

При ударі блискавки в опору в проводах виникає перехідний електромагнітний процес, створюється напруга на ізоляції лінії й утворюються блукаючі хвилі, що поширюються в обидва боки від місця удару. Вектор магнітної складової напруженості поля спрямований вертикально, тому він не може викликати перехідного

процесу в проводах. Перехідний процес у проводах пов'язаний тільки з електричною складовою напруженості поля по осі x і визначається телеграфним рівнянням із правою частиною

$$\frac{\partial^2 U_e}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 U_e}{\partial t^2} = \frac{\partial E_{ex}}{\partial x}. \quad (2.5.1)$$

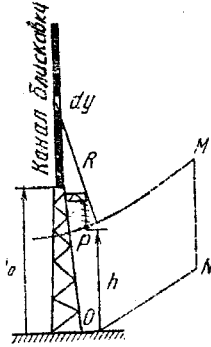


Рис. 2.5.1. До розрахунку індукованої перенапруги при ударі в опору

Результуюче поле в будь-якій точці лінії визначається так:

$$U_i(x,t) = \varphi(x,t) + U_e(x,t) + \int \bar{E}_{my} dt. \quad (2.5.2)$$

Перший член є скалярним потенціалом зовнішнього поля в момент t , другий – напругою, утвореною власними зарядами лінії, що переміщуються вздовж у вигляді блукаючих хвиль. Таким чином, сума двох перших членів визначається зовнішнім полем і називається електричною складовою індукованої напруги U_{ie} .

Третій член залежить від зовнішнього магнітного поля і є магнітною складовою індукованої напруги U_{im} . Магнітне поле не є потенціальним, тому магнітна складова індукованої напруги залежить від шляху інтегрування. Це будемо брати до уваги при розрахунках.

Щоб визначити електричну складову індукованої напруги, підставимо в телеграфне рівняння

$$U_e = U_{ie}(x,t) - \varphi(x,t),$$

і врахуємо, що
$$\frac{\partial E_{ex}}{\partial x} = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2},$$

після чого отримаємо:

$$\frac{\partial^2 U_{ie}(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 U_{ie}(x,t)}{\partial t^2} = -\frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi(x,t)}{\partial t^2}. \quad (2.5.3)$$

Розв'язок цього рівняння має такий вигляд:

$$U_{ie}(x, t) = \frac{1}{2} \int_0^t \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} [\tau, x - c(t - \tau)] d\tau + \int_0^t \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} [\tau, x + c(t - \tau)] d\tau. \quad (2.5.4)$$

Цей розв'язок може бути отриманий звичайними методами теорії диференціальних рівнянь або шляхом простих фізичних міркувань. Під час головного розряду відбувається звільнення зв'язаних у лідерній стадії зарядів на проводі, що розтікаються у вигляді хвиль в обидва боки від місця виникнення. Якщо скалярний потенціал зовнішнього поля змінюється в часі, то в кожній точці проводу в момент τ звільняється елементарний заряд, потенціал якого дорівнює $\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} d\tau$. Результируюча напруга в точці x щодо землі, очевидно, буде дорівнювати сумі напруг окремих елементарних хвиль, що приходять до моменту t у точку x зліва і справа. При цьому кожна хвиля в момент свого виникнення повинна знаходитися на відстані $c(t - \tau)$ зліва або справа від точки x . Сума елементарних хвиль і дає інтеграли рівняння (2.5.4).

Повернемося до випадку удару блискавки у верхівку опори. Векторний потенціал магнітного поля каналу блискавки:

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_{h_0}^y \frac{i(y, t)}{R} dy.$$

При косокутній хвилі розподіл струму по каналу блискавки визначається співвідношенням:

$$\frac{I_M}{\tau_\phi} \cdot \frac{y_t - y}{v} = i(y, t),$$

де $\frac{I_M}{\tau_\phi}$ – крутизна струму;

$y = vt$ – координата головки головного розряду.

При визначенні векторного потенціалу врахуємо «запізнювання»: у момент t значення струму в елементі dy беремо для більш раннього моменту $t - \frac{R}{c}$.

Отже, потенціал у найближчій до місця удару точці проводу:

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{I_M}{\tau_\phi} \cdot \frac{1}{v} \int_{h_0}^{y_t} \frac{vt - h_0 - \beta(y \pm h) - y}{y \pm h} dy = \frac{30 I_M}{c} \cdot \frac{1}{\tau_\phi v} \left[(vt + h_0 + h) \ln(y \pm h) \Big|_{h_0}^{y_t} - (1 - \beta)(y_k - h_0) \right]$$

У момент t поле буде визначатися довжиною каналу блискавки y_k . Врахуємо що, $y_k = v \left(t - \frac{R_k}{c} \right) = vt - \beta R_k$ або $y_k - h_0 = vt - \beta(y_k \pm h)$. Звідки

$y_k = \frac{vt + h_0 \mp \beta h}{1 + \beta}$. Підставляючи в попередню формулу u_k , одержимо векторний «запізнілий» потенціал A в точці $(0, h, 0)$.

Для визначення магнітної складової індукованої напруги візьмемо інтеграл по контуру $OPMN$, маючи на увазі, що магнітна складова напруженості поля спрямована вертикально, а в нескінченності дорівнює нулю. Ось чому:

$$U_{im} = \oint E_{my} dl = \int_0^h E_{my} dh.$$

Опускаючи проміжні обчислення, запишемо остаточний результат:

$$U_{iM} = \int_0^h \left(-\frac{\partial A}{\partial t} \right) dh = 30I_M \beta \frac{t}{\tau_\phi} \left\{ \left[\mp \frac{h_0 \mp h}{vt} \right] + 2 \ln \left(\frac{h_0 \mp h}{vt} + 1 \right) \pm \left[\frac{h_0}{vt} + 2 \ln \left(\frac{h_0}{vt} + 1 \right) \right] \mp \frac{h_0 \mp h}{vt} \ln \frac{h_0 \mp h}{vt} \mp \frac{h_0}{vt} \ln \frac{h_0}{vt} \right\} \quad (2.5.5)$$

де h – висота підвісу проводу;

h_0 – висота опори;

$v = \beta c$ – швидкість головної стадії розряду блискавки.

Для визначення електричної складової індукованої напруги визначаємо потенціал $\varphi = (h, t)$, а потім беремо інтеграл типу (2.5.4).

Остаточно отримаємо:

$$U_{ie} = \int_0^t \frac{\partial \varphi[\tau, c(t - \tau)]}{\partial \tau} d\tau = \pm \frac{30I_M}{1 + \beta^2} \beta \frac{t}{\tau_\phi} \left\{ 1 + \frac{h_0 \mp h}{vt} + \frac{\frac{h_0 \mp h}{vt} + \beta^2}{\sqrt{1 + \beta^2}} \ln \frac{\left(1 + \sqrt{1 + \beta^2} \right) \left(1 + \frac{h_0 \mp h}{vt} \right)}{\sqrt{1 + \beta^2} \sqrt{\left(\frac{h_0 \mp h}{vt} \right)^2 + \beta^2} + \beta^2 + \frac{h_0 \mp h}{vt} - \beta^2} - \sqrt{\left(\frac{h_0 + h}{vt} \right)^2 + \beta^2} \right\} \quad (2.5.6)$$

Вирази, що утворилися, дуже громіздкі. Практично зустрічаються розміри $10 < h < 40$ і $5 < h_0 - h < 7$. При середній довжині фронту струму блискавки в 2,5 мкс сумарне значення індукованої напруги від каналу блискавки приблизно дорівнює:

$$U_i \approx 0,5 I_M h, \quad (2.5.7)$$

де I_M – амплітудне значення струму блискавки, кА;

h – висота підвішення проводу, м.

2.6. Індуковані напруги при ударі блискавки в землю поблизу ЛЕП

Визначимо індуковану напругу на ізоляції при ударі блискавки поблизу лінії (поза смугою $6h$, де всі удари потрапляють у лінію, рис.2.6.1). Щоб спростити і без того досить громіздкі обчислення,

прийемо форму хвилі струму прямокутною. При врахуванні граничної швидкості наростання струму на фронті індукована напруга дещо зменшується, із зниженням швидкості зміни електромагнітного поля навколо каналу блискавки, але зазначене зниження істотно тільки при дуже близьких ударах блискавки. Прийнявши прямокутний фронт хвилі, можна скористатися результатами, приведеними в розділі 1.2. Визначимо магнітну й електричну індуковані напруги.

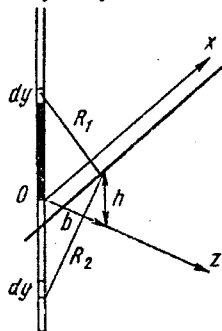


Рис.2.6.1. До розрахунку індукованої перенапруги на проводі при ударі блискавки поблизу лінії

Оскільки удар відбувається поблизу лінії, поле на висоті підвішення проводу можна приблизно вважати рівномірним і при інтегруванні напруженість E_{my} вважати незмінною від висоти і рівною значенню на рівні землі. Індукована напруга в точці лінії, найближчій до місця удару блискавки (при $x=0$)

$$U_{im} = \int_0^h -E_{my} dh = 60I_M h \cdot \frac{\beta}{\sqrt{(vt)^2 + (1-\beta^2)b^2}} = \frac{60I_M h}{b} \cdot \frac{\beta}{\sqrt{\left(\frac{vt}{b}\right)^2 + (1-\beta^2)}} \quad (2.6.1)$$

Напруга виникає в момент, коли в точку лінії приходить сигнал про початок струму головного розряду блискавки, тобто в момент $\frac{b}{c} = \frac{b}{v}\beta$, а потім, як очевидно з формули, зменшується з часом. При хвилі струму з прямокутним фронтом U_{im} максимальна в момент $t = \frac{b}{c}$, причому

$$U_{i_{max}} = \frac{60I_M h}{b} \beta. \quad (2.6.2)$$

Електрична складова індукованої напруги знаходиться через скалярний потенціал поля, як показано в попередньому розділі, інтегруванням виразу

$$U_{ie} = \int_0^t \frac{\partial \phi[\tau, c(t-\tau)]}{\partial \tau} d\tau.$$

Необхідно знати напругу в точці, найближчій до місця удару $x=0$, і в точці, де вже не діє індукція поля блискавки $x \rightarrow \infty$ (це напруга блукаючої хвилі).

Для $x=0$ отримуємо:

$$U_{ie}(0, t) = \frac{60I_M h}{b} \cdot \frac{\beta}{\beta^2 \left(\frac{ct}{b}\right)^2 + 1} \left[\frac{ct}{b} - \frac{1}{\sqrt{\beta^2 \left(\frac{ct}{b}\right)^2 + 1 - \beta^2}} \right]. \quad (2.6.4)$$

Напруга виникає в момент приходу в дану точку сигналу про початок струму головного розряду блискавки, а потім зростає, досягає максимального значення і починає спадати. При швидкості головного розряду $0,2c$ і ($\beta = 0,2$), максимум має місце при $\frac{ct}{b} = 5$ і дорівнює:

$$U_{ie}(0, t)_{\max} \approx (0,4 \div 0,5) \frac{62I_M h}{b}.$$

Напруга блукаючої хвилі визначається за формулою:

$$U_{ie}(\infty, t) = \frac{60I_M h}{b} \cdot \frac{\beta \frac{ct-x}{b}}{1 + \beta^2 \frac{(ct-x)^2}{b^2}}. \quad (2.6.5)$$

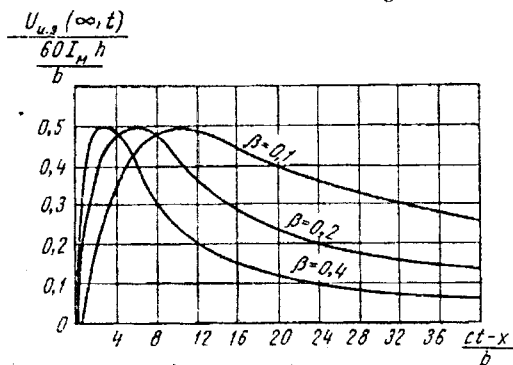


Рис.2.6.2. Індукована перенапруга за межами зони індукції каналу при прямокутній хвилі струму блискавки (по Разевігу)

Величина $(ct - x)$ може приймати будь-які значення, починаючи з нуля. Максимум досягається при $\beta = 0,2$, що відповідає величині $\frac{ct - x}{b} = 5$ і дорівнює

$$U_{ie}(\infty, t)_{\max} = \frac{60I_M h}{b} 0,5.$$

На рис. 2.6.2 зображені результати підрахунків індукованих напруг у віддалених точках лінії $x \rightarrow \infty$ («біжучі хвилі») для прямокутної форми хвилі струму і для різних швидкостей головного розряду $v = \beta c$ блискавки.

На рис. 2.6.3 побудовані графіки сумарної індукованої напруги у точці лінії, найближчої до місця удару блискавки. Форма хвилі струму також прямокутна.

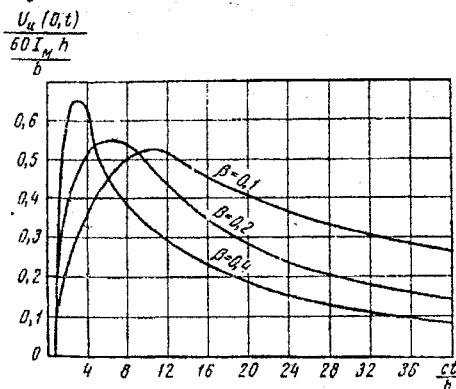


Рис. 2.6.3. Індукована перенапруга в найближчій точці лінії при прямокутній хвилі струму блискавки (по Разевігу)

Сумарне значення індукованої напруги (обидві складові) для найближчої точки лінії приблизно складає при $\beta = 0,1 + 0,4$

$$U_{ie}(\infty, t)_{\max} = \frac{30I_M h}{b}. \quad (2.6.6)$$

Індукована напруга може набувати дуже великих значень. Наприклад, при ударі блискавки з струмом 100 кА на відстані 10 h від лінії напруга досягає 300 кВ. Для практичних цілей важливо знати, не тільки найбільші можливі величини, а і ймовірності появи на лінії індукованих перенапруг різних амплітуд. Розрахуємо цю ймовірність. Як відзначалося, за одну грозову годину на 1 км² поверхні землі припадає 0,067 ударів блискавки. Беручи верхню межу, для смуги

поверхні землі шириною db і довжиною 100 км одержимо $0,067 \cdot 100 \cdot 100 \cdot 10^{-3} db$ ударів за рік. Не всі удари можуть викликати напругу U_i , а тільки удари з струмами $I_M \geq \frac{U_i b}{30h}$. Ймовірність таких ударів можна оцінити за формулою (3'). Число ударів у смузі db , що приводять до напруги U_i , дорівнює:

$$dN = 0,067 db \cdot \exp\left(-\frac{U_i b}{26,1 \cdot 30h}\right).$$

Далі інтегруємо від мінімальної відстані $b_{min} = 3h$ до $b = \infty$ (з обох боків смуги bh) і отримуємо:

$$N_i = 2 \int_{b_{min}}^{\infty} 0,067 e^{-\frac{U_i b}{780h}} db = 23,4 \frac{h}{U_i} e^{-\frac{U_i}{260}}. \quad (2.6.7)$$

Для оцінки впливу індукованих напруг на грозостійкість лінії варто виходити з того, що вплив цей істотний тільки тоді, коли число перекриттів при ударах у землю можна порівняти з числом перекриттів при прямих ударах в лінію. Наприклад, імпульсний рівень ізоляції лінії 110 кВ на металевих опорах складає 820 кВ (при 2,5 мкс). Число появи таких перенапруг у місцевості із середньою інтенсивністю грозової діяльності (100 днів) при висоті підвісу проводів $h = 10$ м за формулою (2.6.7) буде

$$N_i = \frac{23,4 \cdot 100 \cdot 10}{820} e^{-3,84} = 0,613$$

випадків за рік, а ймовірність перекриттів при ударах у лінію без тросу, як буде показано в подальшому, складає приблизно 14 випадків. Звідси ясно, що для ліній 110 кВ і вище індуковані при ударах у землю перенапруги безпечні. Безпечні вони і для ліній 35 кВ на металевих опорах.

Для ліній більш низької напруги на металевих опорах індуковані перенапруги дуже небезпечні. Наприклад, перенапруги порядку 200-300 кВ виникають 7-10 разів за рік на лінії довжиною 100 км.

На лініях із дерев'яними опорами індуковані напруги не можуть викликати перекриття міжфазної ізоляції. Власне навіть для ліній 6-10 кВ на дерев'яних опорах індуковані перенапруги безпечні. Але вони приходять до підстанцій 6-10 кВ і можуть викликати пошкодження ізоляції обертових машин (генераторів, компенсаторів або двигунів), приєднаних безпосередньо до шин. Рівень ізоляції обертових машин нижчий за рівень ізоляції іншого підстанційного обладнання, тому потребує захисту не тільки від хвиль прямих ударів у лінію, але і від хвиль індукованих перенапруг. Обмеження індукованих перенапруг із урахуванням захисту обертових машин буде розглядатись в розділі 5.

2.7. Грозостійкість ліній з тросом

Лінії електропередачі на металевих і на залізобетонних опорах із захисним тросом можуть мати вимикання через зворотні перекриття ізоляції з опори на проводи при ударах блискавки в опори або заземлений трос і внаслідок проривів блискавки поза тросовим захистом.

Очікуване число вимикань лінії $n = n_1 + n_2$, причому n_1 – вимикання за рахунок зворотних перекриттів, а n_2 – вимикання за рахунок проривів на проводи.

Чим вища номінальна напруга лінії, тим вищий рівень лінійної ізоляції і тим менша питома вага першої складової, тоді як друга складова майже не залежить від номінальної напруги лінії, а визначається конструктивними особливостями опор і захисним кутом тросу. Відносна небезпека вимикання лінії внаслідок проривів зростає разом із збільшенням номінальної напруги.

Розглянемо методику підрахунку обох складових.

Ймовірне число вимикань внаслідок зворотних перекриттів

Ймовірне число вимикань лінії внаслідок зворотних перекриттів з тіла опори при ударах блискавки в опору або трос визначається, виходячи з двох розрахункових випадків: удар блискавки у верхівку опори й удар блискавки в трос посередині прогону.

Рівень грозостійкості при ударі в трос залежить від місця удару.

Від місця удару до заземлень сусідніх опор ідуть хвилі перенапруги, які відбиваються від заземлень із зміною полярності і повертаються в місце удару. Напруга в місці удару буде наростати до цього моменту. Чим ближче удар до опори, тим швидше прийде відбита хвиля і тим меншою буде перенапруга. При ударі в трос найбільш небезпечним буде випадок удару в середину прогону.

Перекриття з тросу на провід або з проводу на землю малоімовірно при прогонах нормальної довжини (300-400 м). Хоча індуктивність тросу в прогоні досить велика, напруга не може зростати дуже швидко, тому що обмежена швидкість зростання струму блискавки (до приходу відбитої хвилі трос поводить ся як ізольований провід, тому струм і швидкість наростання струму блискавки будуть приблизно в два рази менші, ніж при ударі в опору. Тільки при дуже великих струмах блискавки і великих опорах заземлення опор можливе перекриття ізоляції, але не в прогоні, а на самій опорі.

Ймовірність розподілу ударів по прогону не піддається точній оцінці, тому будемо вважати, що всі удари в лінію порівну діляться на удари в трос в середині прогону і на удари у верхівку опори. Тоді очікуване число вимикань визначається за формулою:

$$n_1 = \frac{1}{2} N (\vartheta_{i_1} + \vartheta_{i_2}) \cdot \eta, \quad (2.7.1)$$

де ϑ_{i_1} – ймовірність критичного струму блискавки, що приводить до перекриття ізоляції при ударі у верхівку опори;

ϑ_{i_2} – ймовірність критичного струму блискавки, що приводить до перекриття ізоляції на опорі при ударі в трос посередині прогону;

N – загальне число ударів блискавки в лінію;

η – ймовірність переходу імпульсного перекриття в силову дугу.

Розрахунки показують, що при нормальних заземленнях опор ймовірність ϑ_{i_2} майже на порядок менше ймовірності ϑ_{i_1} . Тому розміром ϑ_{i_2} зневажаємо і визначимо очікуване число відключень при обернених перекриттях із тіла опори на провід за формулою

$$n_1 = \frac{1}{2} N \vartheta_{i_1} \eta.$$

Знайдемо грозостійкість лінії при ударі в опору. Напругу в місці удару найпростіше визначити, якщо уявити опори деякою індуктивністю і не враховувати відсмоктування струму по тросу в заземлення сусідніх опор, що при нормальних прогонах не дуже істотно. Напруга на верхівці опори і на тросі для косокутної хвилі струму блискавки в момент $t = \tau_\phi$:

$$U_{1\max} = 0,85 \left(R_3 I_M + L_{on} \frac{I_M}{\tau_\phi} \right), \quad (2.7.2)$$

де 0,85 – коефіцієнт, що враховує відсмоктування струму в заземлення ураженої опори;

R_3 – опір заземлення опори при розтіканні імпульсних струмів;

τ_ϕ – довжина фронту струму блискавки, мкс;

L_{on} – індуктивність опори, яку можна прийняти рівною 0,7 мкГн для опор баштового типу і 0,5 мкГн на погонний метра висоти для опор порталного типу.

Напруга U_1 , що поширюється по тросу, наводить на проводі напругу $U_2 = kU_1$, де k – коефіцієнт зв'язку між тросом і проводом (цей коефіцієнт повинний братися з урахуванням коронування тросу, тобто дещо збільшеним порівняно з коефіцієнтом, обумовленим геометричними параметрами тросу).

При визначенні напруги, що виникає на ізоляції гірлянди, оцінимо вплив індукованої каналом блискавки напруги. Як було показано вище, індукована напруга на проводі $U_i \approx 0,5hI_M$.

Наявність заземленого тросу зменшує індуковану на проводі напругу. Трос виконує розмагнічувальну дію, екрануючи провід від електромагнітного поля каналу блискавки. За наявності тросу індукована напруга на проводі

$$U_i^* = U_i k, \quad (2.7.3)$$

де k – коефіцієнт зв'язку між проводом і тросом.

Таким чином, на проводі буде напруга $kU_i = U_i^*$, на опорі U_i , і на ізоляції гірлянди їх різниця $U_i - kU_i = U_i(1 - k)$.

Робочу напругу на проводі не враховано. Для ліній 35-220кВ робоча напруга складає порівняно невелику частину імпульсної розрядної напруги гірлянди.

Для ліній 330-1150 кВ амплітуда робочої напруги складає 15-20% від імпульсної розрядної напруги. Крім того, напруга одного з проводів трифазної лінії завжди буде мати полярність, протилежну полярності грозової напруги. Тоді напруга на ізоляції гірлянди виявиться такою:

$$U_{is} = (U_1 + U_i)(1 - k) + U_{роб}. \quad (2.7.4)$$

З рівності перенапруги на ізоляції і її імпульсного рівня знайдемо рівень грозостійкості при ударі в опору:

$$\frac{U_{is} - U_{роб}}{1 - k} = I_M \left[0,5h + 0,85 \left(R_3 + \frac{L_{on}}{\tau_{\phi}} \right) \right]. \quad (2.7.5)$$

Звідси ймовірність перекриттів

$$\lg \vartheta_i (\%) = 2 \left(1 - \frac{I_M}{120} \right).$$

Коефіцієнт переходу в силову дугу можна оцінити за формулою, складеною як результат опрацювання даних аварійної статистики:

$$\eta (\%) = 1,6E_{cp} - 6, \quad (2.7.6)$$

де E_{cp} – середній градієнт робочої напруги уздовж шляху імпульсного перекриття, який в даному випадку дорівнює будівельній висоті гірлянди. Формула справедлива при градієнтах $8 \leq E_{cp} \leq 60$ кВ/м. Для ліній 110-220 кВ на металевих опорах коефіцієнт приймається рівним 0,7. Для ліній 330 – 1150кВ ймовірність переходу імпульсного перекриття в дугу $\eta = 1$.

Очікуване число вимикань внаслідок проривів блискавки поза тросовий захист

Якщо позначити ймовірність прориву через \mathcal{G}_α , то очікуване число вимикань

$$n_2 = N \mathcal{G}_\alpha \mathcal{G}_i \eta, \quad (2.7.7)$$

де \mathcal{G}_i – ймовірність струму блискавки, що викликає перекриття ізоляції при ударі в провід.

Ймовірність прориву блискавки поза тросом на провід обумовлена недосконалістю захисту тросом. При дотриманні необхідних кутів захисту майже всі удари блискавки перехоплюються тросами, але не виключається і враження проводу. Як впливає з лабораторного дослідження А.П.Белякова, ймовірність прориву залежить не тільки від кута захисту, а і від висоти підвісу троса і висоти орієнтування блискавки, що вважається пропорційною амплітудному значенню струму блискавки. Для висот підвісу троса порядку 20 м розрахункові дані відповідають експлуатаційним. Тепер ймовірність прориву поза тросом оцінюється тільки на підставі аналізу аварійної статистики великого числа ліній. У розрахунках можна користуватися емпіричною формулою В.В.Бургсдорфа:

$$\lg \mathcal{G}_\alpha (\%) = 0,06\alpha - 2,2, \quad (2.7.8)$$

а для високих опор

$$\lg \mathcal{G}_\alpha = \frac{\alpha \sqrt{h_0}}{90} - 4. \quad (2.7.9)$$

Формула (2.7.9) отримана на підставі досвіду експлуатації дволанцюгових опор висотою до 40-45 м. Залежність ймовірності прориву від висоти фізично зрозуміла. Перед головою лідера, що опускається, є зона попередньої іонізації. Чим вище опора, тим раніше трос потрапляє в цю зону, а в іонізованому середовищі вибірна вражуваність погіршується. Крім того, треба звернути увагу на таку обставину.

Зони захисту блискавковідводів отримані в дослідах при визначеному співвідношенні висоти орієнтування блискавки і висоти тросового блискавковідводу. З дослідів впливає, що при зниженні зазначеного співвідношення ймовірність поразки збільшується. Якщо лабораторна модель правильно відбиває характер грозового розряду, то треба очікувати більшого числа проривів на лініях із високими опорами.

На лініях 35...220 кВ майже всі прориви призводять до перекриття ізоляції, оскільки $\mathcal{G}_i=1$, і число відключень можна визначати за спрощеною формулою $n_2 = N \mathcal{G}_\alpha \eta$.

Таким чином, остаточною формулою очікуваної кількості відключень

$$n = n_1 + n_2 = N \left[\vartheta_a \vartheta_i + \frac{1}{2} (\vartheta_{n1} + \vartheta_{n2}) \right] \eta \quad (2.7.10)$$

або

$$n = N \left[\vartheta_a + \frac{1}{2} \vartheta_{n1} \right] \eta.$$

Розрахунки грозостійкості

Приклад 2.1. Лінія на металевих опорах 220 кВ. Висота опори баштового типу 38 м, висота підвісу проводу 32 м, захисний кут троса 30° , у гірлянді 13 елементів ПС – 6А, імпульсний рівень ізоляції при передрозрядному часі $t=2,5$ мкс дорівнює 1760 кВ, мінімальна розрядна напруга 1300 кВ, опір заземлення опори 3,5 Ом. Коефіцієнт зв'язку 0,266.

Визначимо рівень грозостійкості при ударі в опору.

Індуктивність опори $L_{оп} = 0,7 \cdot 32 = 22,3$ мкГн. При довжині фронту 2,5 мкс за формулою (2.7.5) отримаємо

$$I_{01} = \frac{1760}{1 - 0,266} \cdot \frac{1}{0,5 \cdot 32 + 0,85 \left(3,5 + \frac{22,3}{2,5} \right)} = 90,5 \text{ кА.}$$

Ймовірність такого струму дорівнює

$$\lg \vartheta_{n1} (\%) = 2 \left(1 - \frac{90,2}{120} \right) = 0,493, \quad \vartheta_{n1} = 3,14\%.$$

Рівень грозостійкості при ударі в провід

$$I_0 = \frac{4 \cdot 1300}{400} = 13 \text{ кА.}$$

Ймовірність такого струму

$$\lg \vartheta_i (\%) = 2 \left(1 - \frac{13}{120} \right) = 1,714, \quad \vartheta_i = 60,8\%.$$

Ймовірність прориву блискавки поза тросом за формулою (2.7.9)

$$\lg \vartheta_a = \frac{30\sqrt{38}}{90} - 4 = 1,95 = 2,05, \quad \vartheta_a = 0,01 = 1\%.$$

Число ударів в лінію при 20 грозових днях за рік і довжині лінії 100 км

$$N = 1,8 h_{gp} = 1,8 \cdot 33 = 59,4.$$

Середня висота підвішення троса в прогоні

$$h_{cp} = h_0 - \frac{2}{3} f,$$

де f – стріла провисання.

Коефіцієнт переходу імпульсного перекриття в силову дугу приймемо рівним 0,7.

Очікуване число відключень за рік

$$n = N \left(\mathcal{G}_a \mathcal{G}_i + \frac{1}{2} \mathcal{G}_{ii} \right) \eta = 60(0,01 \cdot 0,608 + \frac{1}{2} 0,0314) 0,7 = 0,915.$$

Кількість років безаварійної роботи (без урахування АПВ)

$$m = \frac{1}{0,915} = 1,1.$$

Така лінія без захисного тросу має очікуване число відключень

$$n = 60 \cdot 0,608 \cdot 0,7 = 25,5.$$

Приклад 2.2. Лінія 110 кВ на металевих опорах. Опори висотою 24,8 м баштового типу, висота підвищення проводу 13,65 м, коефіцієнт зв'язку 0,204, у гірлянді сім малогабаритних ізоляторів ПСМ-4,5, при передрозрядному часі 2,5 мкс імпульсний рівень гірлянди 820кВ, мінімальна імпульсна розрядна напруга 670 кВ. Захисний кут тросу $16,5^\circ$, опір заземлення опори 5 Ом. Довжина лінії 100 км. Інтенсивність грозової діяльності 20 днів за рік.

Рівень грозостійкості при ударі в опору

$$I_{01} = \frac{820}{1 - 0,204} \cdot \frac{1}{0,5 \cdot 13,65 + 0,85 \left(5 + \frac{0,7 + 13,65}{2,5} \right)} = 72,4 \text{ кА.}$$

Ймовірність перекриттів при ударі в опору

$$\lg \mathcal{G}_{ii} (\%) = 2 \left(1 - \frac{72,4}{120} \right) = 0,8, \quad \mathcal{G}_{ii} = 6,3 (\%).$$

Рівень грозостійкості при ударі в провід

$$I_0 = \frac{4 \cdot 670}{400} = 6,7 \text{ кА.}$$

Ймовірність перекриттів при ударі в провід

$$\lg \mathcal{G}_i (\%) = 2 \left(1 - \frac{6,7}{120} \right) = 1,888, \quad \mathcal{G}_i = 77,5 \%.$$

Коефіцієнт переходу в силову дугу 0,7.

Ймовірність прориву поза тросом

$$\lg \vartheta_{\alpha} (\%) = 0,06 \cdot 16,5 - 2,2 = -1,32 = 2,68, \quad \vartheta_{\alpha} = 0,047(\%),$$

або

$$\lg \vartheta_{\alpha} = \frac{16,5\sqrt{24,8}}{90} - 4 = 2,913, \quad \vartheta_{\alpha} = 0,096(\%).$$

Прийmemo перший результат.

Число ударів в лінію

$$N = 1,8h_{cp} = 1,8 \cdot 20 = 36.$$

Очікуване число відключень за рік

$$n = 36 \left(0,00047 \cdot 0,775 + \frac{1}{2} \cdot 0,063 \right) 0,7 = 0,884.$$

Тривалість роботи без аварійних відключень (без урахування АПВ):

$$m = \frac{1}{0,884} = 1,13 \text{ року}$$

Звернемо увагу на те, що кількість відключень за рахунок проривів невелика, усього 1,14%, а в попередньому випадку на лінії 220кВ із значно більшим кутом захисту вимикання за рахунок проривів складала 27,8%.

Тросовий захист для ліній на металевих опорах обов'язковий. Цілкoм виправдане прагнення до зниження кутів захисту. Зростання числа вимикань відбувається не тільки при збільшенні кута захисту, але і при збільшенні висоти опор (наприклад, при переході від порівняно низьких опор порталного типу до опор бапшового типу).

З формули (2.6.4) бачимо також, що висота опори негативно впливає на показники грозостійкості. Це пояснюється, з одного боку, збільшенням напруги на ізоляції внаслідок більшої перенапруги, індукованої на проводі струмом опори, і, з іншого боку, зростанням випадків прориву блискавки поза тросовим захистом, оскільки ймовірність прориву залежить від висоти підвішення троса.

Для ліній до 220-330 кВ, як показують розрахунки і аналіз досвіду експлуатації, ще припустимі кути захисту до 30°. Деяке погіршення тросового захисту спостерігається на нових уніфікованих опорах з одним тросом, які почали застосовувати з метою здешевлення будівництва ЛЕП (простіші опори і їх монтаж, економія тросу). Ці опори вищі (приблизно 40 м) і проводи розташовуються трикутником на однопанцюгових опорах і шестикутником - на двопанцюгових; кут захисту для верхніх проводів збільшується до 30°.

На опорах баштового типу різні умови перекриття з проводів верхніх, середніх і нижніх фаз, і потрібно при точному розрахунку вводити коефіцієнти зв'язку і враховувати розходження в індукованих перенапругах. Більшість відключень припадає на перекриття верхніх гірлянд.

На лініях 500 – 750 кВ і вище кути захисту не повинні перевищувати 20° .

Дуже істотна залежність грозостійкості ЛЕП на металевих опорах із тросом від опору заземлення опори. Якщо в другому прикладі взяти $R_3=10$ Ом, то рівень грозостійкості стане рівним 61,5 кА, а при $R_3 = 20$ Ом знизиться до 42,5 кА, що дасть ймовірність перекриттів при ударі блискавки в опору 19,7%.

На лініях із новими уніфікованими опорами застосовуються малогабаритні ізолятори, розрядна напруга яких зменшена, і тому важливо мати нормальні заземлення опор.

Для ґрунтів із питомим опором до $3 - 5 \cdot 10^4$ Ом·см заземлювачі опор повинні виконуватися з опорами не більшими 10 Ом.

Грозостійкість таких ліній задовільна, оскільки малоймовірні грозові відключення ліквідуються АПВ (автоматичним повторним вмиканням). В останні роки схеми АПВ дуже удосконалені (схеми з перевіркою і без перевірки синхронізму, однофазні АПВ), поліпшилися характеристики вимикачів, тому більшість АПВ успішні. Проте не можна будувати грозозахист тільки на застосуванні АПВ, тому що при надмірно частих відключеннях виникає небезпека розрегулювання вимикачів. Очевидно, що кількість відключень не повинна перевищувати визначеного мінімального рівня, що задовольняє умови надійності електропостачання споживачів.

2.8. Грозостійкість ліній на металевих опорах без тросів

Лінії на металевих або залізобетонних опорах при ефективно заземленій нейтралі (110 кВ і вище) у районах із підвищеною і середньою інтенсивністю грозової діяльності надійно працювати без тросів не можуть, тому що кількість грозових відключень стає неприпустимо великою.

Інше положення має місце на лініях 35 кВ, що працюють у системі з ізольованою або компенсованою нейтраллю. Однофазні замикання на землю тут не є аварійними, дуга емнісного струму швидко ліквідується, особливо за наявності дугогасильної котушки, і коефіцієнт $\eta = 0$ незалежно від середнього градієнта по шляху перекриття.

У мережах із неефективно заземленою нейтраллю відключення може відбуватися тільки при міжфазних перекриттях. Двофазні або трифазні перекриття можливі, але відбуваються рідко. Розглянемо

умови, за яких може відбуватися міжфазне замикання на лініях 35 кВ із металевими опорами. При враженні проводу (якщо розташування проводів горизонтальне, то вражається, як правило, один із крайніх проводів) перекривається його гірлянда, і струм блискавки починає стікати по стійці опори в її заземлювач. При ударі поблизу опори напруга на опорі і на враженому проводі (не враховуємо індуктивності опори, тому що висота її невелика) дорівнює

$$U_1 = I_M (z \parallel R_3 \parallel z) \approx R_3 I_M. \quad (2.8.1)$$

На сусідньому проводі напруга дорівнює kU_1 , а на міжфазну ізоляцію припадає напруга $U_1 - U_1 k = (1 - k)I_M R_3$. Звідси

$$I_M = I_0 = \frac{U_{из}}{(1 - k)R_3}. \quad (2.8.2)$$

Рівень грозостійкості ліній на металевих опорах при неефективно заземленій нейтралі, дуже близький до рівня грозостійкості ліній на металевих опорах із тросом у системах з ефективно заземленою нейтраллю і також дуже залежить від опору заземлювача опори.

Виняток складають лінії 110 кВ в районах, де великий питомий опір ґрунту, коли переваги ефективного заземлення відпадають (струми однофазного короткого замикання через великі опори заземлення на підстанціях стають малі, релейний захист ускладнюється і т.п.). В лініях середньої напруги застосування дугогасильних котушок цілком себе виправдовує, і компенсацію нейтралі можна розглядати як засіб грозозахисту.

Приклад 2.3. Лінія 35 кВ без троса на металевих (залізобетонних) опорах. Гірлянда з трьох елементів ПС-4,5 із мінімальною імпульсною розрядною напругою 350 кВ. Коефіцієнт зв'язку між проводами 0,3. Опір заземлення опори 10 Ом.

Питоме число прямих ударів блискавки (на 100 км при 20 грозових днях)

$$N_0 = 1,8 \cdot h_{cp} = 1,8 \cdot 10 = 18.$$

Рівень грозостійкості визначаємо за формулою (2.8.1)

$$I_0 = \frac{350}{(1 - 0,3)400 \parallel 400 \parallel 10} = 52,6 \text{ кА}.$$

Ймовірність перекриттів міжфазної ізоляції при цьому

$$\lg \mathcal{P}_i (\%) = 2 \left(1 - \frac{52,6}{120} \right) = 1,124, \quad \mathcal{P}_i = 13,3 (\%).$$

Ймовірність переходу імпульсного перекриття в силову дугу $\eta(\%) = 1,6 \cdot 35 - 6 = 50\%$, де середній градієнт робочої напруги $E_{cp} = \frac{35}{1} = 35 \text{ кВ/м}$ (довжина двох гірлянд приблизно 1 м).

Питоме число відключень (на 100 км при 20 грозових днях)

$$n = N \eta, \eta = 18 \cdot 0,133 \cdot 0,5 = 1,2.$$

При опорі заземлень 20 Ом аналогічний розрахунок дає ймовірність перекриттів 35% і питоме число відключень 3,15, а при опорі 5 Ом ймовірність перекриттів 2,152% і питоме число відключень 0,193.

Природні заземлювачі опор (залізобетонні підножки і фундаменти) не забезпечують нормованих опорів розтіканню струму, тому на лініях 35 кВ на металевих або залізобетонних опорах без тросів доцільно закладати поблизу фундаментів додаткові електроди і тим знижувати опір заземлення. Грозостійкість ліній 35 кВ без тросів, але з нормованими опорами заземлювачів, достатня. Не можна, проте, не враховувати такого недоліку котушок як грозозахисного засобу. В мережах із компенсованою нейтраллю можлива тривала (до двох годин) робота з замиканням на землю, що є перевагою, але в такому режимі грозове перекриття однієї з незаземлених фаз призведе до двохфазного короткого замикання і відключення лінії. Ймовірність таких випадків, того ж порядку, що і неуспішних АПВ на лініях без захисних тросів у системах з ефективно заземленою нейтраллю.

2.9. Грозостійкість ліній на дерев'яних опорах без тросів

Лінії на дерев'яних опорах без троса мають порівняно непогані грозозахисні показники. Застосування дерева значно підвищує імпульсний рівень лінійної ізоляції, що дає досить високий рівень грозостійкості, а збільшені розрядні проміжки ускладнюють виникнення силових дуг. Перехід імпульсного перекриття в силову дугу ускладнений також тим, що дерево, уздовж якого відбувається перекриття, інтенсивно деіонізує канал розряду.

Лінії на дерев'яних опорах мають комбіновану ізоляцію: гірлянди і дерево стійок і траверс. По комбінованій ізоляції розряд розвивається відповідно до розподілу напруги по фарфору і дереву, що залежить від розподілених провідностей і ємностей елементів ізоляційних конструкцій. Коли дерево сухе, імпульсний рівень комбінованої ізоляції дорівнює сумі розрядних напруг по фарфору і дереву. За експериментальними даними в середньому напруга перекриття дерева при нормальній вологості складає 200-300 кВ на погонний метр.

Для гірлянд і дерев'яних траверс ліній 110 кВ і 35 кВ побудовані вольт-секундні характеристики, зображені на рис. 2.9.1.

Починаючи з моменту 2-3 мкс, характеристики стають пологими, і імпульсний рівень міжфазної ізоляції (дві гірлянди і половина траверси: 2×6×ПС-4,5 і 4 м дерева – для 110 кВ і 2×2×ПС-4,5 і 3 м дерева – для 35кВ) можна вважати рівним 1750 кВ і 1100 кВ.

Електричний рівень ізоляції щодо землі (гірлянди – частина траверси – стійка) оцінюється приблизно 3000 кВ для опор 110 кВ.

Найчастіше відбувається перекриття міжфазної ізоляції, рідше – перекриття на землю.

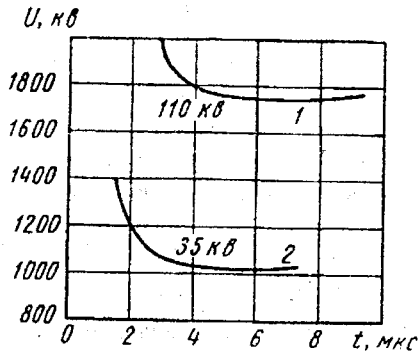


Рис. 2.9.1. Вольт-секундна характеристика ізоляції дерев'яних П-подібних опор

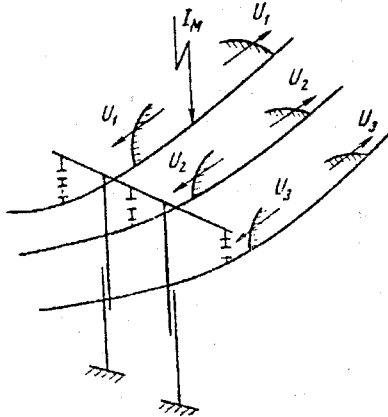


Рис. 2.9.2. До розрахунку рівня грозостійкості при ударі блискавки в лінію на дерев'яних опорах

При горизонтальному розташуванні проводів звичайно вражається один із крайніх проводів (рис. 2.9.2). В обидві сторони від місця удару по проводу поширюються хвилі перенапруги.

На сусідніх проводах хвиля U_1 наводить U_2 і U_3 , причому останні дорівнюють $U_2 = k_{12}U_1$ і $U_3 = k_{13}U_1$, де k_{12} і k_{13} – коефіцієнти зв'язку.

До ізоляції між фазами прикладена перенапряга $U_1 - U_2$. Прирівнюючи її до імпульсного рівня ізоляції, знаходимо струм, при якому відбувається перекриття між фазами. Оскільки удар відбувся в провід, «заземлений» через дуже великий хвильовий опір, для розрахунку ймовірності перекриттів зробимо перерахунок на умови удару в «добре заземлений» об'єкт. Отже, рівень грозостійкості

$$I_0 = \frac{4U_{из}}{(1-k)z}. \quad (2.9.1)$$

Тепер визначимо ймовірність виникнення дуги. На шлях перекриття прикладена лінійна робоча напруга. Середні градієнти тут значно менші, ніж на металевих опорах внаслідок великих відстаней. Для лінії 110 кВ

$E_{cp} = \frac{110}{6} = 18,5$ кВ/м і ймовірність виникнення дуги $\eta = 1,6 \cdot 18,5 - 6 = 23\%$; для лінії 35 кВ $E_{cp} = 10$ кВ/м і ймовірність дуги $\approx 10\%$. Ймовірність перекриттів визначаємо за формулою (1.2.2). Очікуване число відключень лінії в рік дорівнює $n = N\vartheta\eta$.

При розрахунку можливості міжфазних перекриттів на дерев'яних опорах можна не враховувати індуковані каналом блискавки перенапряги. Вони однакові на всіх проводах і не можуть викликати перекриття ізоляції.

Приклад 2.4. Визначимо грозостійкість ЛЕП 110 кВ на дерев'яних опорах із шістьма елементами ПС-4,5 у гірляндах. Відстань між фазами 4 м. Коефіцієнт зв'язку (із поправкою на корону) $k = 0,3$.

Лінія довжиною 57 км проходить по місцевості з підвищеною інтенсивністю грозової діяльності 45 грозових годин. Середня висота підвищення проводів 9,5 м.

Приймаючи імпульсний рівень ізоляції 1750 кВ і хвильовий опір проводу 400 Ом, отримаємо

$$I_0 = \frac{4 \cdot 1750}{(1-0,3) \cdot 400} = 25 \text{ кА}.$$

Ймовірність такого струму

$$\lg \vartheta_i (\%) = 2 \left(1 - \frac{25}{120} \right) = 1,584, \quad \vartheta_i = 38,4 (\%).$$

Число ударів в лінію визначаємо за формулою (2.1.1)

$$N = 1,8 h_{cp} \frac{1}{100} \cdot \frac{D}{20} = 1,8 \cdot 9,5 \cdot \frac{57}{100} \cdot \frac{130}{20} = 14,6.$$

Очікувана кількість грозових відключень лінії

$$n = 14,6 \cdot 0,384 \cdot 0,23 = 1,32.$$

Термін безаварійної роботи (без врахування АПВ)

$$m = \frac{1}{n} = \frac{1}{1,32} = 0,76 \text{ року}$$

Питома кількість відключень (на 100 км при 20 грозових днях) складає 1,5 за рік.

Для ліній 35 кВ розрахунок дає питому кількість відключень 0,54. Лінії 35 кВ звичайно мають довжину 20-25 км. Отже, число відключень складає 0,1-0,135 за рік або приблизно 8 років роботи без аварій. Експлуатаційна статистика показує приблизно такі ж середні числа. Індивідуальна врахуваність і аварійність ліній може істотно відрізнятися від середньої.

Спостерігаються в експлуатації випадки перекриття по стійці опори на землю. Як впливає з прикладу 2.4, напруга на проводі, при якій можливе перекриття міжфазної ізоляції, складає $\frac{1750}{1 - k} = 2500$ кВ, тобто майже стільки ж, скільки потрібно для перекриття по стійці опори. Ймовірність відключень при розрядах по стійці значно менша. На довгий шлях розряду припадає фаза робоча напруга, а не лінійна.

Грозостійкість ліній на дерев'яних опорах без троса нижча, ніж ліній з тросами. Проте ці лінії дешевші приблизно на 20% і будуються швидше. Опори на залізобетонних приставках можуть експлуатуватися 20 - 50 років. Недоліками дерев'яних опор при потужних ударах блискавки є їх можливі розщеплення. Механічна міцність при цьому не порушується, але розщеплення призводить до швидкого загнивання деревини.

2.10. Грозостійкість ділянок ліній на дерев'яних опорах з тросом

Ділянки підходів ліній до підстанцій виконуються з тросами. Для розрахунку грозостійкості таких ділянок може застосовуватися методика, яка розроблена для ліній з тросом на металевих опорах.

Приклад 2.5. Показники грозостійкості підходу до підстанції 110 кВ на дерев'яних П- і АП-подібних опорах нормального типу з опором заземлення 10 Ом, захисним кутом тросів $37,5^{\circ}$, імпульсним рівнем ізоляції (гірлянда із 7 елементів ПС-4,5 і 2 м дерева траверси до заземлювального спуску) 1180 кВ, коефіцієнтом зв'язку (при прамуванні хвилі по обох тросах) між проводом і тросом 0,37 - такі: рівень грозостійкості при ударі в трос поблизу опори 140 кА, ймовірності перекриття 0,437%, прориву поза

тросом 1,12%, критичного струму при ударі в провід 70% і перекриття ізоляції на опорі 0,823%.

Грозостійкість підходу достатньо велика. Це дуже важливо, тому що інакше важко гарантувати захист підстанції від хвиль, що набігають.

Підхід до підстанцій 35 кВ звичайного виконання має дещо гірші показники грозостійкості. Розрахунок виконується аналогічно попередньому прикладу 110 кВ, оскільки однофазне перекриття на опорі, хоча і не викликає відключення ЛЕП, проте обумовлює появу на проводі хвилі перенапруги небезпечної для ізоляції підстанції.

2.11. Грозостійкість ліній 10 кВ на дерев'яних опорах

Лінії 10 кВ виконуються звичайно на дерев'яних опорах із кріпленням ізоляторів на стійці і траверсі. Для повного використання ізоляції дерева мінімальні відстані збільшують до 1 м. При цьому градієнт робочої напруги складає приблизно 3-10 кВ/м, і ймовірність переходу в силову дугу не перевищує 10%.

Істотного збільшення грозостійкості можна досягти застосуванням дерев'яних траверс із відстанню між фазами 1,5-2 м. Але дерев'яні траверси ускладнюють конструкцію, тому такі опори можна рекомендувати тільки для районів з інтенсивною грозовою діяльністю.

Дуже високу грозостійкість мають лінії із трикутним розташуванням проводів, коли верхній провід є захисним, граючи роль заземленого троса. Ударом блискавки майже завжди вражається верхній провід, відділений від заземлювального спуску штирбовим ізолятором, який і перекривається. Поки не ліквідувалася дуга система працює в режимі заземлення фази на землю, що для мереж 10 кВ з ізолюваною або компенсованою нейтраллю, не є аварією. Лінія може відключитися тільки при зворотному перекритті із заземлювального спуску на один із нижніх проводів і при встановленні силової міжфазної дуги. Випадок цей аналогічний лінії 35 кВ на металевій опорі без троса. Грозостійкість лінії з захисним проводом визначається за формулою (2.8.2).

Приклад 2.6. Визначимо показники грозостійкості лінії 10 кВ на дерев'яних опорах із трикутним розташуванням проводів (рис.2.11.1). Висота підвішення верхнього проводу 9,4 м, нижніх проводів 8 м. Кут екранування верхнім проводом нижніх $\alpha=30^\circ$. Коефіцієнт зв'язку між проводами (з урахуванням корони) 0,35. Ізоляція між нижнім проводом і заземлювальним спуском ШД-10 і 0,7 м дерева (мінімальна імпульсна розрядна напруга 200 кВ), між верхнім проводом і заземлювальним спуском ШД-10 і захисний проміжок 80мм (мінімальна напруга 130 кВ). Середня висота підвішення верхнього проводу 8,4 м. Опір заземлення 30 Ом.

Визначимо ймовірність прориву блискавки на нижні проводи за формулою (2.7.8)

$$\lg \mathcal{G}_\alpha (\%) = 0,06 \cdot 30 - 2,2 = 1,6, \quad \mathcal{G}_\alpha = 0,4(\%).$$

Така ймовірність прориву практично може не враховуватися, тому вважаємо, що всі удари блискавки вражають верхній провід. Рівень грозостійкості при ударах в верхній провід і зворотне перекриття із заземлювального спуску на нижній провід

$$I_0 = \frac{U_{\text{из}}}{(1-k)(z \parallel R \parallel z)} = \frac{200}{(1-0,35)200 \parallel 30} \approx 12 \text{кА}.$$

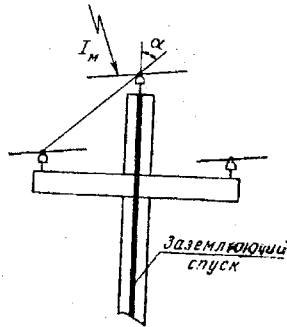


Рис. 2.11.1. До розрахунку грозостійкості лінії 10 кВ з трикутним розташуванням проводів

Ймовірність таких перекриттів

$$\lg \mathcal{G}_i (\%) = 2 \left(1 - \frac{12}{120} \right) = 1,8, \quad \mathcal{G}_i = 63(\%).$$

Середній градієнт уздовж шляху перекриття

$$E_{\text{cp}} = \frac{10}{0,7} + 0,08 \cdot 2 = 11,6 \text{ кВ/м}.$$

Ймовірність переходу в силову дугу

$$\eta = 1,6 \cdot 11,6 - 6 = 13\%.$$

Число ударів на 100 км за 20 грозових днів

$$N_0 = 1,8 h_{\text{cp}} = 1,8 \cdot 8,4 = 15,1,$$

Питоме число відключень

$$n_0 = N_0 \vartheta \eta = 15,1 \cdot 0,63 \cdot 0,13 = 1,22.$$

Якщо електричний опір ґрунту дозволяє дешево зробити опір заземлення ≤ 30 Ом, то лінія на дерев'яних опорах із захисним проводом стає доцільною. За грозостійкістю вона аналогічна лінії на металевих опорах із тросом. Лінії 10 кВ проходять звичайно в забудованих місцевостях, тому вражаються прямими ударами блискавки рідко.

Контрольні запитання

1. Які основні критерії грозостійкості ЕТК?
2. Який принцип покладено в грозозахист від ПУБ?
3. Що таке захисний кут тросового блискавковідводу?

РОЗДІЛ 3. ДЕФОРМАЦІЯ І ЗГАСАННЯ ХВИЛЬ ПЕРЕНАПРУГИ НА ПІДХОДАХ ДО ПІДСТАНЦІЙ

При ударі блискавки в лінію або в землю поблизу лінії на проводах виникають хвилі перенапруги. Амплітуда і форма хвилі в місці удару визначаються параметрами струму блискавки і розрахункової схеми. Хвиля поширюється уздовж лінії і змінюється за амплітудою і за формою. Аналіз хвильових процесів у лініях має дуже важливе принципове і практичне значення, тому що тільки знаючи параметри хвилі, що набігає на підстанцію з лінії, можна раціонально спроектувати і здійснити захист підстанційного устаткування від атмосферних перенапруг.

Процес поширення хвилі описується диференціальними рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}, \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}. \end{aligned} \right\} \quad (3.1.1)$$

Сюди входять параметри на одиницю довжини лінії:

L_0 – індуктивність, що враховує магнітне поле в проводі, у повітрі і землі;

R_0 – активний опір шляху хвильового струму по проводу і через землю;

C_0 – ємність проводу лінії відносно землі;

G_0 – активна провідність, якою за відсутності корони на проводі можна знехтувати, оскільки вона визначається дуже слабкими струмами витоку через ізоляцію.

Розв'язок системи рівнянь (3.1.1) за наявності всіх параметрів і в умовах багатопроводної системи дуже складний, і результат не виражається в елементарних функціях.

При русі хвиль з амплітудами, меншими, ніж критична напруга корони, деформація і згасання визначаються винятково активними втратами в проводах і землі.

При амплітудах більших напруги початку корони, згадані чинники в кількісному відношенні стають малоістотними, і процес згасання пов'язаний із втратами на імпульсну корону, що виникає навколо проводу.

Нижче розглядаються формули для оцінки крутизни хвилі після пробігу вздовж лінії.

Якщо треба мати уявлення про амплітуди хвиль після пробігу, то грубу оцінку можна зробити за допомогою формули згасання (передбачається, що немає корони)

$$U = U_0 e^{-\frac{R_0 t}{2L_0}} = U_0 e^{-\frac{R_0 \cdot x}{2L_0 v}} = U_0 e^{-\frac{R_0 \cdot x}{2z}}, \quad (3.1.2)$$

де U_0 – амплітуда хвилі в місці удару;

z – хвильовий опір;

R_0 – активний опір на одиницю шляху.

Для врахування поверхневого ефекту, величину R_0 треба брати відповідно еквівалентній частоті, півперіод якої дорівнює довжині заданої хвилі. Активний опір провідів залежить від перерізу провідника і ρ металу. Активний опір шляху через землю залежить від питомої провідності ґрунту, частоти і висоти підвішення проводу. За формулою Рюдєнберґа для високих частот опір землі

$$R_3 = \frac{\sqrt{0,2 f \rho}}{h} \text{ Ом/км}$$

причому треба підставляти h у м, f у Гц, ρ в Ом·м.

При частоті 10^4 Гц (еквівалентна хвилі довжиною 50 мкс) і гарному ґрунті ($\rho = 100$ Ом·м) опір землі

$$R_3 = \frac{\sqrt{0,2 \cdot 10^4 \cdot 100}}{10} = 45 \text{ Ом/км.}$$

На повітряних лініях врахування згасання внаслідок опору землі істотний тільки для дуже високих питомих опорів ґрунту. Наприклад, при його середній величині 100 Ом·м згасання після пробігу 2 км порівняно невелике

$$U = U_0 e^{-\frac{45}{2 \cdot 400} \cdot 2} = U_0 e^{-0,12} \approx 0,9 U_0.$$

В кабельних лініях згасання хвиль сильніше, ніж у повітряних. Хоча питомий опір кабелю і невеликий, проте, згасання зростає через поверхневий ефект, що витискує хвильовий струм на жилу і оболонку кабелю, особливо при хвилях малої довжини. Оскільки хвильовий опір кабелю $z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$ дуже малий (порядку 5...40 Ом), то декремент згасання є дуже значним.

Якщо напруга хвилі виявиться більшою напруги початку іонізації, то згасання посиляться внаслідок стрімкого зростання діелектричних втрат. Напруга іонізації визначається не тільки конструкцією кабелів різного виконання, але і різним терміном служби (старіння ізоляції).

3.1. Деформація фронту хвиль внаслідок опору землі

Згасання хвиль при напругах менших коронної обумовлено втратами в проводах і землі, оскільки зворотний струм повертається через землю. Втрати в проводах при хвильових процесах мають другорядне значення. Головним чинником згасання хвилі можна вважати опір землі з врахуванням поверхневого ефекту.

Переписуючи рівняння (3.1.1) в операторній формі, отримаємо

$$\frac{d^2 U(p)}{dx^2} = \gamma^2 U(p) \quad \text{і} \quad U(p) = U_0 e^{-\gamma x}, \quad (3.1.1)$$

де операторна постійна поширення хвилі

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + pL_0)(G_0 + pC_0)}. \quad (3.1.2)$$

Оскільки розглядаються хвилі з амплітудою напруги, недостатньою для корони, то можна знехтувати поперечною провідністю $G_0 = 0$. Магнітним полем усередині проводу і активним опором проводу знехтуємо також. Отже,

$$\gamma = \sqrt{pC_0 [R_3 + p(L_3 + L_B)]} = \sqrt{p^2 L_B C_0} \sqrt{1 + \frac{R_3 + pL_3}{pL_B}},$$

або, з урахуванням того, що $\frac{1}{\sqrt{L_B C_0}} = v$,

$$\gamma = \frac{p}{v} \sqrt{1 + \frac{z_3(p)}{pL_B}}.$$

Оцінімо повний опір землі $z_3(p)$. При дуже великих частотах активний і індуктивний опори шляху струму через землю однакові і модуль z_3 дорівнює $\sqrt{2}R_3$. Із наведеної вище формули Рюдєнберга випливає, що R_3 залежить від кореня квадратного частоти. Отже, і z_3 пропорційно кореню квадратному частоти. Вважаючи $j\omega > p$, маємо $z_3(p) = a\sqrt{p}$.

Таким чином, постійна розповсюдження хвилі

$$\gamma = \frac{p}{v} \sqrt{1 + \frac{a\sqrt{p}}{pL_B}} = \frac{p}{v} \sqrt{1 + \frac{a}{L_B\sqrt{p}}}$$

При дуже великих частотах і малому часові, тобто дуже великих p , корінь можна знайти приблизно:

$$\sqrt{1 + \frac{a}{L_B\sqrt{p}}} \approx 1 + \frac{a}{2L_B\sqrt{p}}$$

і результат записати так:

$$U(p) = U_0 e^{-\gamma x} = U_0 e^{-\frac{px}{v}} e^{-\frac{a\sqrt{px}}{2L_B v}} = U_0 e^{-\frac{px}{v}} e^{-\frac{a\sqrt{px}}{2z}}$$

де хвильовий опір петлі «провід-земля» $z = \sqrt{\frac{L_B}{C_0}} = L_B v$.

За теоремою запізнювання множення зображення функції на $e^{-p\frac{x}{v}}$ означає, що вихідна функція зміщується в бік позитивних t на величину $\frac{x}{v}$. Іншими словами, $U_0 e^{-p\frac{x}{v}}$ відповідає хвилі U_0 , що біжить без згасання в бік позитивних x : $U_0(t - \frac{x}{v})$.

Множник $e^{-\frac{a\sqrt{px}}{2z}} = e^{-bx\sqrt{p}}$ характеризує зміну амплітуди і форми хвилі при її прямованні по лінії.

Зображення має такий вигляд:

$$e^{-bx\sqrt{p}} = 1 - \Phi\left(\frac{bx}{2\sqrt{t}}\right),$$

де $\Phi(\varphi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\varphi e^{-z^2} dz$ — інтеграл ймовірності (або функція Крампа).

Спільне врахування опору землі і проводу приводить до складнішого виразу $U(p)$, який вимагає асимптотичного розкладання його в числовий ряд. В практичних розрахунках звичайно обмежуються першим членом розкладання. Базуючись на точнішій, ніж формула Рюдєнберга формулі Поллячека для R_3 , і, бажаючи врахувати наступні члени асимптотичного розкладання, можна запропонувати для практичних розрахунків такий коефіцієнт b :

$$b = \frac{\sqrt{\mu_0 \rho}}{b \pi z h},$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнітна проникність вакууму;

ρ – питомий опір ґрунту, Ом м;

z – хвилястий опір проводу, Ом;

h – висота підвищення проводу, м.

Отже, остаточно одержуємо, що вихідна прямокутна хвиля після пробігання відстані x деформується і набуває вигляду:

$$U(x, t) = [1 - \Phi(\varphi)] U_0, \quad (3.1.3)$$

де інтеграл ймовірності береться від аргументу

$$\varphi = \frac{bx}{2\sqrt{\tau}},$$

де τ є час, що відраховується від моменту приходу хвилі в дану точку x , тобто $\tau = t - \frac{x}{v}$.

В розрахунках перенапруг важливим параметром є крутизна хвилі після пробігання визначеної відстані.

Виходячи з формули (3.1.3), можна отримати

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial \tau} = -U_0 \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \tau}.$$

Відповідно до правила диференціювання визначеного інтеграла, у якого тільки верхня границя залежить від змінної φ , потрібно підставити в вираз під інтегралом верхню границю і результат помножити на похідну верхньої границі. Отже,

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\varphi^2}, \quad \frac{d\varphi}{d\tau} = -\frac{bl}{4} \tau^{-\frac{3}{2}} = -\frac{\varphi}{2\tau},$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{U_0 \varphi}{\sqrt{\pi \tau}} e^{-\varphi^2}.$$

Максимальне значення $\frac{\partial U}{\partial \tau}$ відповідає величині $\varphi_m = \sqrt{\frac{3}{2}}$, в чому

можна переконатися, прирівнюючи похідну $\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial U}{\partial \tau} \right)$ до нуля.

Аргументу φ_m відповідає час $\tau_m = \frac{b^2 l^2}{6}$. Таким чином, максимальна крутизна визначається за формулою

$$\left. \frac{dU}{dt} \right|_{\max} = \frac{U_0}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot e^{\frac{3}{2}}}{\tau_m} = U_0 \cdot \frac{1}{6,5 \tau_m}. \quad (3.1.4)$$

Ця крутизна відповідає довжині еквівалентного косокутного фронту в мікросекундах

$$\tau_\phi = \frac{U_0}{\left. \frac{dU}{dt} \right|_{\max}} = 6,5 \tau_m = \frac{b^2 l^2}{6} \cdot 6,5,$$

або, підставляючи значення b , остаточно отримаємо

$$\tau_\phi \approx \frac{\rho \cdot l^2}{260 h^2 z^2}. \quad (3.1.5)$$

Приклад 3.1. Визначимо деформацію хвилі після пробігання відстані 2 км. Висота підвищення проводу над землею $h=10$ м. Питомий опір землі $\rho = 100$ Ом·м, $z = 500$ Ом. За формулою (3.1.5) визначаємо довжину фронту:

$$\tau_\phi \approx \frac{100 \cdot 2000^2}{260 \cdot 100 \cdot 500^2} = 0,0615 \text{ мкс.}$$

Отриманий результат показує, що після пробігання хвилею декількох кілометрів в ґрунтах з невеликим опором деформацією фронту хвилі можна нехтувати.

В ґрунтах із великим питомим опором деформація відчутніша, наприклад, при $\rho = 1000$ Ом·м довжина фронту зростає (при тому ж пробіганні 2 км) до 0,615 мкс.

Як відзначалося, опір проводів у розрахунках звичайно не враховується. Для сталевих проводів або тросів врахування цього опору обов'язкове, і деформація хвилі стає дуже значною.

3.2. Згасання і спотворення хвиль перенапруги при русі вздовж повітряної лінії від імпульсної корони

При напругах, що перевищують початкове критичне, на проводах утворюється імпульсна корона. З підвищенням напруги розвиваються іонізаційні процеси. Структура коронного чохла залежить від полярності проводу. При негативній полярності електрони рухаються в зовнішню область, а в прошарку біля проводу залишаються

малорухомі позитивні іони. Електрони попадають в область слабого поля і пристають до нейтральних часток газу, створюючи негативні іони. Таким чином, навколо проводу створюється позитивний об'ємний заряд, оточений у свою чергу негативним об'ємним зарядом. З часом при зниженні напруги корони чохол розпадається. Іони частково розсіюються в просторі або компенсуються зарядами проводу.

Постійна часу розпаду коронного чохла, значно більша довжини хвилі грозової перенапруги, тому можна вважати, що розташування об'ємного заряду з часом не змінюється. При позитивній полярності хвилі коронний чохол складається з позитивних малорухомих іонів. Позитивна корона більш інтенсивна і веде до більшого згасання хвилі. Оскільки більшість хвиль прямого удару блискавки мають негативну полярність, то негативній імпульсній короні приділяється більше уваги.

Подвійний іонізований прошарок об'ємних зарядів зв'язує на проводі заряд σ_c (на одиницю довжини). Крім заряду σ_c на проводі розміщується заряд, обумовлений геометричною ємністю проводу $\sigma_0 = C_0 U$. Сумарний заряд на проводі $\sigma_k = \sigma_0 + \sigma_c$. Між сумарним зарядом проводу, що коронує, і напругою хвилі існує така залежність:

$$\sigma_k = \sigma_0(1 + BU) = C_0 U(1 + BU), \quad (3.2.1)$$

де коефіцієнт B залежить від висоти підвішення проводу h і від діаметра проводу (рис. 3.2.1). При великих діаметрах і висоті $h = 10$ м коефіцієнт $B = (0,5 - 0,2) \cdot 10^{-3} \text{ 1/кВ}$.

Звідси можна визначити зв'язаний заряд:

$$\sigma_c = C_0 B U^2. \quad (3.2.2)$$

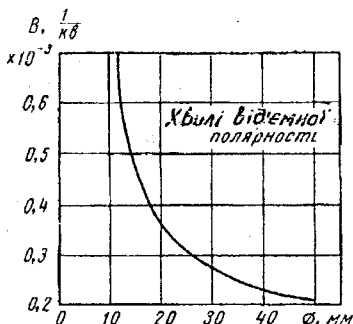


Рис. 3.2.1. Залежність коефіцієнта B від діаметра проводу

Якщо розділити заряд коронуючого проводу на напругу, то можна отримати ємність коронуючого проводу $C_k = C_0(1+BU)$, яка більша за геометричну ємність.

Зростання ємності проводу при імпульсній короні веде до зниження хвильового опору проводу і зростання коефіцієнта електромагнітного зв'язку між коронуючими проводами.

Хвильовий опір коронуючої лінії наближено визначається за формулою:

$$z_k \approx \sqrt{\frac{L}{C_k}} = \frac{z_0}{\sqrt{1+BU}}, \quad (3.2.3)$$

де Z_0 – хвильовий опір лінії без втрат. При напругах до 1000-1500 кВ хвильовий опір повітряної лінії знижується з 450 ... 500 до 400 Ом, а при напругах у декілька тисяч кіловольт хвильовий опір знижується до 300 ... 350 Ом.

Корона призводить до спотворення і згасання хвилі перенапруги на перших кілометрах пробігу по лінії. Фізичне пояснення спотворення хвилі полягає в тому, що при утворенні імпульсної корони губиться енергія хвилі. Енергія губиться тільки на фронті, тобто поки утворюються заряди коронного чохла, і тому саме на фронті відбувається деформація хвилі. На хвості хвилі розвиток імпульсної корони припиняється, і коронний чохол починає повільно розпадатися. На рис. 3.2.2 наведені осцилограми згасання хвиль на реальних лініях. З осцилограм видно, що після пробігу крутизна хвилі дуже знижується, і максимум деформованої хвилі приблизно збігається з точкою перетину кривої деформованої хвилі з хвостом початкової. Це спостереження буде використано в розрахунку спотворення хвилі після пробігання.

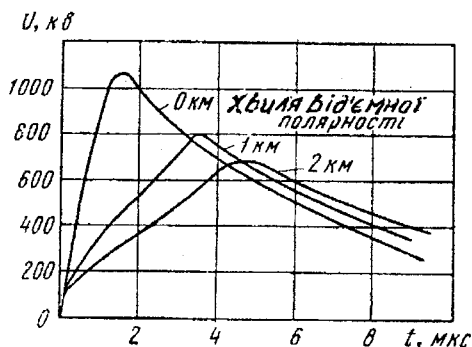


Рис.3.2.2. Затухання хвиль на лінії

На фронті хвилі, що біжить по лінії, при зростанні напруги більше початкової критичної енергія витрачається на створення імпульсної корони (втрати на іонізацію, створення навколо проводу іонізованого чохла об'ємних зарядів, втрати на теплове і світлове випромінювання). Позначимо питому потужність втрат на одиницю довжини через W_{π} . Тоді рівняння балансу енергії запишеться у вигляді:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = W_{\pi}. \quad (3.2.4.)$$

Питому потужність втрат можна визначити через струм корони, який дорівнює похідній пов'язаного коронного заряду в часі, тобто:

$$i_{\kappa} = \frac{\partial \sigma_c}{\partial t} = 2C_0 BU \frac{\partial U}{\partial t}. \quad (3.2.5)$$

Питома потужність втрат $W_{\pi} = i_{\kappa} U$. З огляду на вираз (3.2.5), можемо записати $W_{\pi} = 2C_0 BU^2 \frac{\partial U}{\partial t}$. При визначенні енергії хвилі можна знехтувати струмом корони в порівнянні із струмом хвилі, тому що він значно менший.

$$\text{Потужність хвилі } P = iu = \frac{U^2}{z_0}.$$

$$\text{Похідна потужності хвилі за шляхом: } \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{2U}{z_0} \cdot \frac{\partial U}{\partial x}.$$

Перепишемо рівняння балансу енергії:

$$-\frac{2u}{z_0} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} = 2C_0 BU^2 \frac{\partial U}{\partial t}.$$

Звідси, після відповідних перетворень одержуємо диференціальне рівняння в частинних похідних, що кількісно відтворює деформацію хвилі:

$$c \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + BU \frac{\partial U}{\partial t} = 0. \quad (3.2.6)$$

У формулі (3.2.6) враховано, що $z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$ а швидкість світла $c = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$.

Розв'язок рівняння має вигляд:

$$U = F\left(t - Bu \frac{x}{c}\right) = F(\tau). \quad (3.2.7)$$

В цьому можна переконатись після підстановки формули (3.2.7) в (3.2.6):

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial F(\tau)}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial t} = \frac{\partial F(\tau)}{\partial \tau} \left(1 - B \frac{x}{c} \cdot \frac{\partial u}{\partial t}\right), \quad (3.2.8)$$

звідси

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\frac{\partial F}{\partial \tau}}{1 + B \frac{x}{c} \cdot \frac{\partial F}{\partial \tau}}.$$

Аналогічно

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial F(\tau)}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial x} = \frac{\partial F(\tau)}{\partial \tau} \left(-B \frac{x}{c} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{BU}{c}\right),$$

звідси

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{-\frac{BU}{c} \cdot \frac{\partial F(\tau)}{\partial \tau}}{1 + B \frac{x}{c} \cdot \frac{\partial F}{\partial \tau}}.$$

Підставляючи $\frac{dU}{dx}$ і $\frac{dU}{dt}$ в (3.2.6), одержуємо тотожність, що і треба було довести:

$$\frac{-\frac{cBU}{c} \cdot \frac{\partial F(\tau)}{\partial \tau}}{1 + B \frac{x}{c} \cdot \frac{\partial F}{\partial \tau}} + \frac{BU \frac{\partial F(\tau)}{\partial \tau}}{1 + B \frac{x}{c} \cdot \frac{\partial F}{\partial \tau}} = 0.$$

Час у рівнянні (3.2.7) відраховується від моменту приходу хвилі в точку x . Якщо час відраховувати від початку процесу в точці $x=0$, тобто брати не t , а $t - \frac{x}{c}$, то рівняння можна записати так:

$$U = F\left(t - \frac{x}{v}\right), \quad (3.2.7')$$

де $v = \frac{c}{1 + BU}$ - "фазова" швидкість.

Фронт хвилі поширюється із швидкістю світла c , але швидкість переміщення окремих точок фронту, окремих значень напруги на фронті

хвилі, зменшується і тим більше, чим вища напруга, тому що зростають втрати на імпульсну корону.

Запис (3.2.7) означає, що, якщо відома форма хвилі на початку пробігання (у точці $x=0$), то після пробігання відстані $x=l$ форма хвилі утворюється зсувом ординат фронту на відрізки $BU \frac{l}{c}$ проти напрямку хвилі (рис. 3.2.3). Зсув фронту доводиться до перетинання з хвостом. Форма хвоста в першому наближенні залишається незмінною. Осцилограми не виявляють характерної сходинки при $U = U_{н.к.}$, тому що крім втрат на корону відбувається деформація хвилі за рахунок активних втрат в землі і проводі.

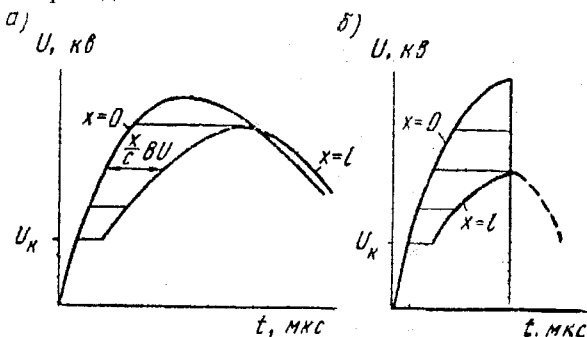


Рис.3.2.3. До розрахунку затухання хвилі

Побудовою одержимо і амплітуду хвилі. Коли фронт хвилі не цікавить, то амплітуду можна приблизно оцінити, за формулою Фауста і Менжера. Якщо виходити з припущення, що падіння потенціалу на одиницю шляху пропорційно квадрату напруги, то $-\frac{dU}{dx} = nU^2$. Звідси, розділяючи змінні і інтегруючи, отримаємо:

$$-\frac{dU}{U^2} = ndx, \quad U_x = \frac{U_0}{1+nU_0x}. \quad (3.2.9)$$

Коефіцієнт n отримано експериментально. Для довгих хвиль середня величина $n = (1,5 \div 3) \cdot 10^{-4}$, причому більші значення відносяться до позитивної полярності хвиль.

Найбільшу небезпеку з погляду перенапруг на ізоляції підстанцій становлять довгі хвилі, амплітуда яких при пробіганні відстані в один-два кілометри змінюється незначно.

Деформацію фронту таких хвиль звичайно оцінюють за середньою крутизною еквівалентної косокутної хвилі. Цей дуже важливий для практики розрахунковий випадок розглянемо докладніше.

Із формули (3.2.4) і рисунок 3.2.3 видно, що зсув точок ординат фронту пропорційний напрузі, тому після пробігання фронт збереже косокутну форму, але крутизна його буде набагато меншою. Для будь-якої напруги, більшої за критичну початкову, справедливе співвідношення (рис.3.2.4):

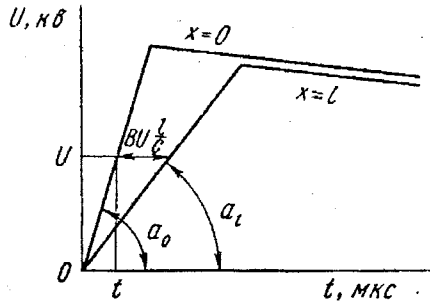


Рис.3.2.4. Загущання хвилі з косокутним фронтом

$$U = a_0 t = a_x \left(t + BU \frac{x}{c} \right) = a_x \left(t + Ba_0 t \frac{x}{c} \right).$$

Звідси одержуємо значення крутизни після пробігання відстані x :

$$a_x = \frac{a_0}{1 + a_0 B \frac{x}{c}}. \quad (3.2.10)$$

3.3. Коефіцієнт зв'язку і вплив на нього імпульсної корони

В розрахунках перенапруг на лініях електропередач істотне значення мають коефіцієнти зв'язку. За допомогою коефіцієнтів зв'язку можна визначити напруги, індуковані на ізолюваних проводах хвилями перенапруг, що розповсюджуються по тросу або іншому проводу після ударів блискавки. Коефіцієнти зв'язку можна визначити з рівнянь, що описують рух хвиль у багатопровідній системі. У багатопровідній системі лінії без втрат напруги і струму пов'язані між собою системою рівнянь

Звідки коефіцієнт зв'язку проводів 1 і 2 із проводом 3

$$k = \frac{z_{13} + z_{23}}{z_{11} + z_{12}}. \quad (3.3.4)$$

Імпульсна корона на проводах дуже істотно змінює умови поширення хвиль у багатопровідній системі. Вище було показано, що хвиля, розповсюджуючись вздовж проводу, навколо якого утворюється імпульсна корона, сильно деформується: ординати хвилі переміщуються з різними фазовими швидкостями, причому остання тим менша, чим вища напруга. Хвилю будь-якої форми можна уявити як ряд елементарних прямокутних хвиль. Формула (3.2.7') дає наближений вираз для фазової швидкості елементарної хвилі. Точніше швидкість елементарної хвилі $v = \frac{1}{\sqrt{LC'_k}}$, де C'_k – диференціальна

ємність коронуючого проводу, яка дорівнює $\frac{d\sigma_k}{dU} = C_0(1 + 2UB)$ і тому:

$$v = \frac{c}{\sqrt{1 + 2BU}}. \quad (3.3.5)$$

При короні поле хвилі, що рухається, перестає бути плоским. З'являється поздовжня складова напруженості, що викликає в ізолюваному проводі переміщення зарядів, і тому потенціал його не може просто визначатися геометричним коефіцієнтом зв'язку.

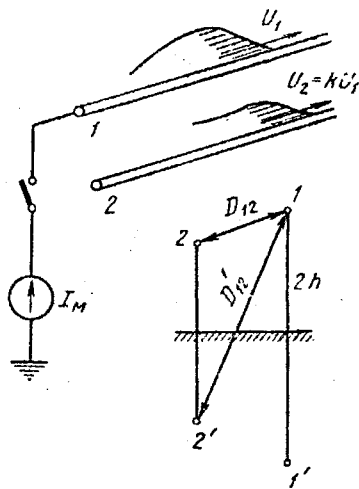


Рис. 3.3.1. Визначення геометричного коефіцієнта зв'язку

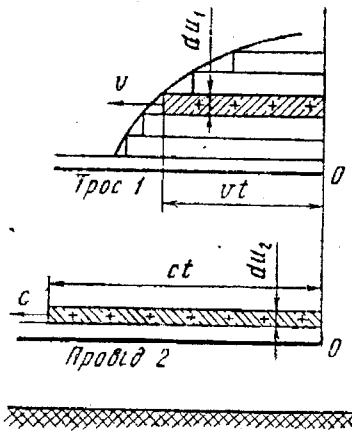


Рис. 3.3.2. Визначення хвильового опору коронуючого проводу і коефіцієнта зв'язку при цьому

Розглянемо переміщення по проводу (тросу) 1 однієї з елементарних хвиль (рис.3.3.2). Якби провід 2 не мав провідності у поздовжньому напрямку, то розповсюдження хвилі du_1 , викликало б у ньому тільки поперечний зсув зарядів, причому при полярності, прийнятій на рис. 3.3.1, негативні заряди були б пов'язані з зарядами хвилі du_1 , а позитивні створювали б на проводі напругу «пасивно»; провід 2 набував би потенціал точок поля проводу 1. Насправді провід 2 є гарним провідником, і вільні позитивні заряди можуть рухатися. На проводі 2 немає корони, тому заряди рухаються із швидкістю світла, тобто швидше, ніж заряди хвилі du_1 , які рухаються з фазовою швидкістю v . Ясно, що лінійна щільність зарядів на проводі 2 буде зменшуватися. За той же час позитивні заряди проводу 2 проходять шлях у $\frac{c}{v}$ разів більший, ніж позитивні заряди проводу 1. В оберненій пропорції зменшується щільність зарядів і утворювана ними на проводі 2 напруга

$$dU_2 = \frac{v}{c} \cdot \frac{z_{12}}{z_{11}} \cdot \frac{d\sigma_k}{c_0} = \frac{v}{c} \cdot \frac{z_{12}}{z_{11}} \cdot \frac{d\sigma_k}{c_0} \cdot \frac{du_1}{du_1}$$

Підставляючи v і $\frac{d\sigma_k}{du_1}$, одержимо рівняння зростання напруги на проводі 2

$$dU_2 = \frac{z_{11}}{z_{12}} \sqrt{1 + 2BU_1} dU_1.$$

Миттєве значення напруги на проводі можна знайти інтегруванням попереднього рівняння

$$U_2 = \frac{z_{12}}{z_{11}} \cdot \frac{1}{3B} \left[\sqrt{(1 + 2BU_1)^3} - 1 \right] = \frac{z_{12}}{z_k} U_1.$$

Вираз

$$\left[\frac{z_{11} 3BU_1}{\sqrt{(1 + 2BU_1)^3} - 1} \right] \approx \frac{z_{11}}{\sqrt{1 + BU_1}} = z_k \quad (3.3.6)$$

є хвильовим опором коронуючого проводу, а $\frac{z_{12}}{z_k}$ є коефіцієнтом зв'язку з урахуванням корони.

Для випадку двох коронуючих тросів, по яких поширюється хвиля перенапруги, коефіцієнт зв'язку тросів із проводом

$$k = \frac{z_{13} + z_{23}}{z_{11k} + z_{12k}}, \quad (3.3.5')$$

причому хвильові опори тросів z_{11k} і z_{12k} треба визначати з врахуванням корони. Хвильовий опір з врахуванням корони є функцією миттєвого значення напруги. Коефіцієнт зв'язку при наявності корони можна представити через геометричний коефіцієнт зв'язку і поправочний множник

$$k = \frac{z_{12}}{z_k} \cdot \frac{z_0}{z_0} = k_0 k_k. \quad (3.3.7)$$

Поправочний множник залежить не тільки від абсолютної величини напруги на тросі, а і від геометричних розмірів лінії. Розмір поправочного множника росте при збільшенні висоти підвішення троса і зменшенні його радіуса. Як показують теоретичні розрахунки і експерименти на лініях, коефіцієнт зв'язку зростає за рахунок імпульсної корони у середньому на 10...30%.

Контрольні запитання

1. Які фактори впливають на деформацію і згасання грозових хвиль?
2. Який механізм імпульсної корони?
3. Як впливає імпульсна корона на коефіцієнт зв'язку?

Розділ 4. ГРОЗОЗАХИСТ ПІДСТАНЦІЙ ВІД ХВИЛЬ, ЩО НАБІГАЮТЬ З ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ.

Рівень ізоляції апаратів на підстанціях за економічними показниками вибирається меншим порівняно з ізоляцією ліній. Блукаючі хвилі, що виникли на певній відстані від підстанції, можуть створити небезпеку для ізоляції її устаткування. Пошкодження ізоляції на опорі відбувається, як правило, у вигляді перекриття гірлянди ізоляторів, яке усувається дією АПВ. Пошкодження ізоляції на підстанції відбувається у вигляді електричних пробів комбінованої ізоляції з серйозними uszkodженнями апаратів, вимиканням підстанції і тривалими перервами в роботі дорогого устаткування. Ушкодження устаткування на підстанціях призводить до порушень нормальної роботи електричної системи. Це звичайна причина аварій в системі.

Вимоги до грозозахисту підстанції повинні бути більш жорсткими, ніж до грозозахисту ліній. На підстанціях грозозахист від блукаючих хвиль здійснюється за допомогою вентиляльних розрядників. У останні роки досягнутий значний прогрес у конструюванні і виробництві вентиляльних розрядників, що дозволяє створювати надійні схеми грозозахисту підстанцій.

Розроблені і освоєні промисловістю розрядники на всі номінальні напруги. Завдяки захисним характеристикам сучасних вентиляльних розрядників вдається координувати внутрішню і зовнішню ізоляцію трансформаторів і інших апаратів при дещо знижених запасах рівнів ізоляції. Це дає істотний економічний ефект.

При заданих характеристиках ізоляції устаткування і розрядників проектування схем грозозахисту підстанцій зводиться до обґрунтованого вибору довжини захищених підходів ліній до підстанцій і визначення кількості і місць установки вентиляльних розрядників у схемі підстанції, що може бути зроблено тільки в результаті детального аналізу хвильового процесу, який виникає на підстанції при набіганні з лінії хвилі атмосферної перенапруги. З погляду вибору захисту важлива загальна заступна схема підстанції. Перевірка координації характеристик ізоляції апаратів і розрядників повинна проводитися для всіх можливих схем роботи даної підстанції (різній кількості підключених до шин ліній, сумісна або роздільна робота секцій і систем ошиновки, виведення у ремонт секцій із приєднаними розрядниками і т.д.).

Найвигідніша схема захисту може бути спроектована тільки при урахуванні всіх індивідуальних особливостей даної підстанції і при реальній оцінці можливих і найбільш ймовірних хвиль перенапруг, що приходять із лінії.

Проектування грозозахисту є комплексною задачею.

Найбільш раціональне розташування вентиляльних розрядників на підстанціях із складною заступною схемою можна визначити експериментально на аналізаторах грозозахисту.

У цій главі дані розрахунки для найбільш простих заступних схем підстанцій (тупикова підстанція) і обґрунтовуються типові рішення. Також даються основні положення методики розрахунку показника грозостійкості підстанції, тобто числа років безаварійної роботи. Визначення показника грозостійкості дає змогу порівнювати якість можливих проектних рішень і для орієнтації робітників експлуатації, оскільки цей критерій безпосередньо характеризує ступінь надійності грозозахисту.

4.1. Обмеження хвилі перенапруги, що набігає з лінії, вентиляльним розрядником

Щоб зрозуміти роль вентиляльних розрядників у схемах грозозахисту підстанцій, проаналізуємо просту заступну схему, зображену на рис.4.1.1. Не зупиняючись на конструктивних особливостях вентиляльних розрядників, обговоримо їх характеристики, оскільки саме вони визначають рівень ізоляції обладнання підстанції і, отже, надійність

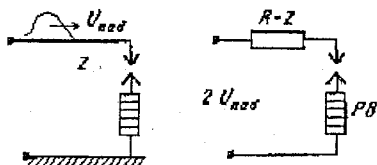


Рис. 4.1.1. Набігання хвилі на вентиляльний розрядник

захисту підстанції від хвиль грозових перенапруг.

Підстанція подана вузловою точкою, до якої залучений вентиляльний розрядник. У вузлову точку по лінії з хвильовим опором z падає хвиля $U_{гзд}$.

Вольт-амперна характеристика вентиляльного розрядника задана графіком справа на рис. 4.1.2. На тому ж рисунку зліва в координатах «напруга-час» дається вольт-секундна характеристика вентиляльного розрядника. Поки проміжки вентиляльного розрядника не пробилися, хвиля відбивається від розімкнутого кінця цілком, тобто подвоюється. У момент часу t_1 відбувається пробій іскрових проміжків вентиляльного розрядника, і до вузлової точки приєднується робочий опір розрядника. Тепер напруги і струми в схемі пов'язані співвідношенням

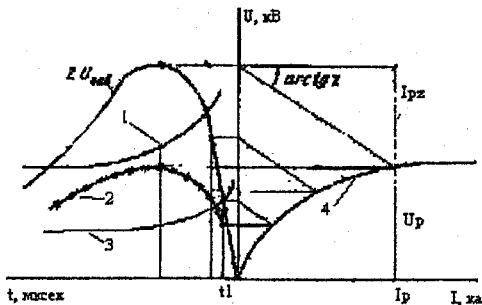


Рис. 4.1.2. Обмеження хвилі перенапруги вентиляним розрядником
 1 – вольт-секундна характеристика ізоляції, 2 – залишкова напруга,
 3 – вольт-секундна характеристика розрядника, 4 – вольт-амперна
 характеристика РВ

$$2U_{над} = zI_p + U_p. \quad (4.1.1)$$

Оскільки розрядник є нелінійним елементом, це рівняння розв'язується графічно, що і зроблено на рис. 4.1.2.

З точок, що відповідають координатам подвоєної падаючої хвилі, під кутом $\arctg z$ проводяться промені до перетину з вольт-амперною характеристикою розрядника і знаходяться відповідні цим значенням падаючої хвилі напруги і струми в розряднику. Зліва будується залежність від часу напруги на розряднику при проходженні через нього імпульсного струму грозової хвилі. Ця напруга називається залишковою і є важливою характеристикою вентиляного розрядника, що визначає його захисні властивості: вона повинна бути менше електричного рівня ізоляції.

Між вольт-секундною характеристикою ізоляції при повній хвилі і залишковою напругою інтервал складає до 10%.

Найбільше значення залишкової напруги, яке відповідає амплітудному значенню струму падаючої хвилі, не повинно перевищувати пробивної напруги іскрових проміжків, інакше захисна дія розрядника знизиться.

Імпульсні струми, що проходять через розрядник, можуть досягати декількох кілоампер, і напруга на розряднику тим менша, чим більш полого вольт-амперна характеристика. Вітчизняні розрядники мають робочі опори з вліту, який має достатню нелінійність (вентильність). Вольт-амперна характеристика влітового диска в логарифмічних координатах є ламаною прямою, тобто аналітично виражається залежностями $U_p = A_1 I_p^{\alpha_1}$ і $U_p = A_2 I_p^{\alpha_2}$, причому перша ділянка

відповідає малим струмам (порядку робочих або супровідних), а друга – імпульсним струмам порядку декількох кілоампер. На першій ділянці характеристики коефіцієнт нелінійності $\alpha_1 = 0,28 \div 0,32$, на другому – $\alpha_2 = 0,18 \div 0,22$, постійні A різні: $A_1 < A_2$.

Вольт-амперна характеристика вентиляційного розрядника не ідеальна ($\alpha \neq 0$), тому для обмеження залишкової напруги нормують величину імпульсного струму. Гарантований імпульсний струм вітчизняних розрядників 5...10 кА. Пропускна спроможність розрядників значно більше. При хвилях довжиною 10...15 мкс віліт руйнується струмами, що перевищують 30...40 кА. Із збільшенням довжини хвилі пропускна спроможність розрядників падає.

Залишкова напруга на вентиляційному розряднику залежить не тільки від нелінійності матеріалу дисків робочого опору, а також і від того, як організоване гасіння супровідного струму.

Після проходження хвилі перенапруги розрядник залишається приєднаним до робочої напруги фази і через нього буде проходити струм промислової частоти, який треба швидко погасити, тому що за термічно стійкістю віліт не припускає тривалого проходження навіть невеликого струму. Зниження напруги на розряднику до робочої призводить до різкого зростання його опору і зниження струму промислової частоти. Супровідний струм гаситься багатократним іскровим проміжком протягом одного-двох півперіодів. У момент проходження струму через нуль електрична ізоляція швидко відновлюється (за рахунок «ефекту холодного катода в короткому проміжку»), а напруга, що знаходиться у фазі із струмом, зростає на проміжку повільно.

У розрядниках серії РВС граничне значення супровідного струму, який надійно гаситься протягом півперіоду промислової частоти, складає усього 80...100А. Очевидно, кількість вілітових дисків у розряднику повинна бути такою, щоб обмежувати струм промислової частоти до цього значення. Граничний струм через розрядник залежить від його опору і від значення найбільшої напруги промислової частоти на розряднику. Ця напруга приймається більшою номінальної фазної з огляду на можливі підвищення напруги при несиметричних коротких замиканнях із землею.

Збіг несиметричного короткого замикання з роботою розрядника на здоровій фазі достатньо імовірний. Це може бути наслідком одного грозового розряду. Підвищення напруги на здоровій фазі при замиканні на землю пошкодженої залежить від характеру заземлення нейтралі в системі.

У системах із заземленою нейтраллю підвищення напруги тим вище, чим більше відношення результуючого опору нульової послідовності щодо даної точки до результуючого опору прямої послідовності. Особливо великі підвищення напруги можуть бути в повітряних мережах на підстанціях, де за умовами релейного захисту або для обмеження струму однофазного короткого замикання застосовується часткове або навіть повне розземлення нейтралей установлених трансформаторів. Відношення $\frac{x_0}{x_1}$ досягає 4...5 і на здоровій фазі напруга зростає до $(1,3...1,45)U_\phi$ або 75...85% лінійної напруги.

У системах із незаземленою нейтраллю на здоровій фазі встановлюється лінійна напруга (110% з урахуванням підвищення на станціях). За характером заземлення нейтралей трансформаторів усі підстанції підрозділяються на класи А, У, С, Д і на них відповідно застосовуються розрядники 75, 80, 90, 100 і 110%.

Знайдемо зв'язок залишкової напруги на розряднику з граничним струмом гасіння і найбільшою припустимою напругою промислової частоти.

Нехтуючи розходженням коефіцієнтів на крутій і пологій ділянках вольт-амперної характеристики, отримаємо

$$U_{ocm} = AI_u^\alpha \sqrt{2}U_c = AI_c^\alpha,$$

звідки

$$\frac{U_{ocm}}{\sqrt{2}U_c} = \left(\frac{I_u}{I_c}\right)^{\alpha_2}.$$

Як очевидно, залишкова напруга на розряднику при імпульсному струмі тим менша, чим менша припустима напруга промислової частоти і чим більший граничний струм гасіння.

Для серії РВС відношення гарантованого імпульсного струму до граничного приблизно дорівнює 100. Приймаючи $\alpha_2 = 0,2$, отримаємо

$$\lg\left(\frac{U_{ocm}}{\sqrt{2}U_c}\right) = 0,2 \lg 100 = 0,4$$

або

$$U_{ocm} = 2,5\sqrt{2}U_c \approx 3,5U_c.$$

Наприклад, найбільша припустима напруга на 110 кВ 100% розряднику складає 100 кВ. Залишкова напруга становить приблизно

350 кВ. Точні значення можна взяти з таблиці електричних характеристик розрядників. Для зазначеного розрядника при струмі 5000 А напруга, що залишається, складе 335 кВ.

У розрядниках серії РВМГ і РВМК гасіння супровідного струму інтенсифікується обертанням дуги за допомогою постійного магнітного поля. За півперіод промислової частоти дуга здійснює декілька десятків обертів по кільцевому іскровому проміжку. При зберіганні «ефекту холодного катода» граничний струм гасіння можна збільшити в декілька разів. У серії РВМГ струми гасіння за півперіод складають 250...300 А проти 80...100 А серії РВС.

Для розрядників цієї серії справедливе таке співвідношення:

$$\lg\left(\frac{U_{ост}}{\sqrt{2}U_c}\right) = 0,2 \lg 30 = 0,29$$

або

$$U_{ост} \approx 2,8U_c.$$

Залишкова напруга розрядника РВМГ-110 при імпульсному струмі 5000А складає 265 кВ проти 335 кВ розрядника серії РВС.

Перехід до більш сучасних магнітно-вентильних розрядників дозволив знизити рівні ізоляції електричних установок і підвищити надійність захисту підстанцій, особливо з апаратурою, що має ослаблену ізоляцію.

4.2. Перепад напруги між вентильним розрядником і трансформатором

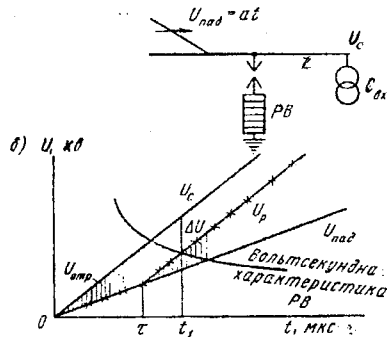


Рис.4.2.1. До розрахунку перепаду напруги між РВ і трансформатором (по ходу хвилі РВ ближче до трансформатора)

За напругою, що залишається на розряднику, можна дуже приблизно судити про перенапруги на ізоляції підстанційної апаратури

і у першу чергу на ізоляції трансформатора – найдорожчого і відповідального елемента підстанцій.

Між розрядником і трансформатором відстань по шинах складає звичайно декілька десятків метрів і тому має місце значний перепад напруги. Урахування цього перепаду необхідне для того, щоб скласти собі уявлення про так звану «зону захисту вентильним розрядником».

Розберемо найпростішу схему (рис.4.2.1,а). По шинах на розрядник, відділений від трансформатора відстанню l метрів, набігає косокутна хвиля. Нехай у момент t_1 розрядник пробивається, але сигнал про зріз перенапруги прийде до трансформатора через час

$$\tau = \frac{2l}{v}$$

Поки $t < \tau$, на трансформатор, що у хвильовому процесі представлений його вхідною ємністю, впливає тільки падаюча хвиля $U_{nad} = at$. Напряга на трансформаторі визначається рівнянням

$$2U_{nad} = iz + \frac{1}{C_{ax}} \int idt \quad (4.2.1)$$

або

$$zC_{ax} \frac{dU_c}{dt} + U_c = 2at.$$

Опускаючи елементарні перетворення, запишемо

$$U_c = 2a \left[t - T \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \right], \quad (4.2.2)$$

де $T = zC_{ax}$.

Від вхідної ємності трансформатора відбивається хвиля

$$U_{omp} = U_c - U_{nad} = a \left[t - 2T \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \right].$$

До приходу відбитої хвилі на пряга на розряднику дорівнює

$$U_p = at = U_{nad}.$$

Після приходу відбитої хвилі

$$U_p = U_{nad}(t) + U_{omp}(t - \tau) = 2a \left[\left(t - \frac{\tau}{2} \right) - T \left(1 - e^{-\frac{t-\tau}{T}} \right) \right].$$

Запишемо перепад напруги між трансформатором і розрядником

$$\Delta U = U_c - U_p = 2a \left[t - T \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) - t + \frac{\tau}{2} + T \left(1 - e^{-\frac{t-\tau}{T}} \right) \right] = 2a \left[\frac{\tau}{2} + T e^{-\frac{t}{T}} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}} \right) \right]. \quad (4.2.3)$$

Спочатку перепад негативний. У деякий момент t перепад напруги дорівнює нулю, потім по мірі заряду вхідної ємності перепад наближається до величини $a\tau$.

З огляду на те, що при

$$t = t\Delta U = 0 = T e^{-\frac{t}{T}} \left(1 + e^{-\frac{\tau}{T}} \right) + \frac{\tau}{2},$$

$$t = T \ln \frac{T \left(e^{-\frac{\tau}{T}-1} \right)}{\frac{\tau}{2}} = T \ln \frac{2 \left(e^{-\frac{\tau}{T}-1} \right)}{\frac{\tau}{T}}.$$

Звичайно $T \gg \tau$. Беручи межу при $\frac{\tau}{T} \rightarrow 0$, отримаємо

$$t_* = T \ln 2 = 0,69zC_{\text{вх}}.$$

Якщо розрядник спрацьовує при $t_1 < t_*$, то напруга на ізоляції менша напруги на розряднику. Практично розрядник спрацьовує пізніше моменту t_* і напруга на ізоляції більша напруги, що залишається на розряднику.

Вираз для перепаду можна одержати ще простіше, якщо припустити, що вхідна ємність трансформатора дуже мала і, отже, практично заряджається миттєво. Тоді відбита хвиля дорівнює падаючій. Напруга на трансформаторі

$$U_c = U_{\text{над}} + U_{\text{опр}} = 2at.$$

Напруга на розряднику до приходу відбитої хвилі становить

$$U_p = at.$$

Після приходу відбитої хвилі

$$U_p = at + a(t - \tau) = 2at - a\tau.$$

Нехай у момент t_1 спрацює розрядник і перепад напруги в цей момент і всі наступні дорівнює $\Delta U = U_c - U_p = a\tau$. Якщо $\tau \gg t_1$, то відбита хвиля не встигає прийти раніше, ніж спрацює розрядник $U_p = at_1 = U_{PB}$, отже, на ізоляції в мережі буде перенапряга $U_c = 2at_1 = 2U_{PB}$, рівна подвійній напрузі, що залишається на розряднику.

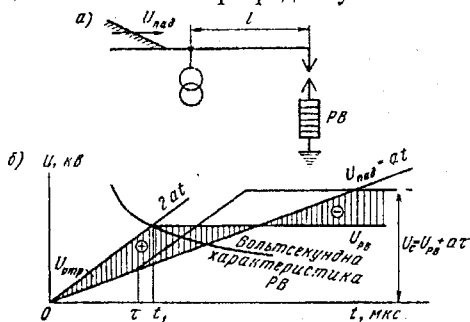


Рис.4.2.2. До розрахунку перепаду напруги між РВ і трансформатором (по ходу хвилі ближче до трансформатора)

Перепад не залежить від взаємного розташування розрядника і трансформатора. Вище був розглянутий випадок, коли по ходу хвилі ближче розташований розрядник. Тепер припустимо, що хвиля набігає раніше на трансформатор і лише через час τ приходить до розрядника (рис. 4.2.3,а). Поки іскрові проміжки розрядника не гробилися, падаюча хвиля відбивається як від розімкнутого кінця лінії, тобто цілком, і напруга на розряднику $U_p = 2at$. Якщо в момент t_1 розрядник спрацює, то напруга на ньому залишиться незмінною і рівною U_{PB} . При цьому припустимо, що залишкова напруга на розряднику приблизно дорівнює напрузі, при якій пробиваються іскрові проміжки (порівняно із рис.4.2.1). Від розрядника до трансформатора прийде відбита хвиля

$$U_{отр} = U_{PB} - U_{над} = U_{PB} - at.$$

Напруга на трансформаторі при відліку часу від моменту приходу падаючої хвилі до трансформатора дорівнює

$$U_c = U_{над} + U_{отр} = at + U_{PB} - a(t - \tau) = U_{PB} + a\tau.$$

Звідси перепад $\Delta U = a\tau$.

Обидва розглянутих випадки подані на рис. 4.2.2,б і 4.2.3,б. На рис.4.2.3,б ординати відбитої хвилі показані штрихуванням: поки падаюча хвиля менша U_{PB} , відбита хвиля позитивна; в момент, коли падаюча хвиля вже більше U_{PB} , відбита хвиля негативна і знижує напругу на трансформаторі до значення $U_{PB} + a\tau$.

Розглядалася падаюча хвиля з нескінченною довжиною фронту і, отже, із необмеженою амплітудою. Практично хвилі, що приходять на підстанцію, мають обмежену амплітуду: $U_{пад\ max} = a\tau_\phi$. Якщо час $\tau > \tau_\phi$, то найбільша напруга на ізоляції дорівнює

$$U_{с\ max} = U_{пад\ max} + \frac{U_{PB}}{2},$$

оскільки максимальне позитивне значення відбитої від розрядника хвилі (див. рис. 4.2.3,б) складає $\frac{U_{PB}}{2}$. Цей випадок неприпустимий, тому що перенапруга на ізоляції не повинна перевищувати амплітуди падаючої з лінії хвилі, яка може бути істотно більшою рівня ізоляції устаткування на підстанції. Реально τ завжди менше τ_ϕ .

Таким чином, незалежно від взаємного розташування розрядника і трансформатора по ходу хвилі перепад напруги між ними

$$\Delta U = a\tau = \frac{2l}{v} a. \quad (4.2.4)$$

Перепад напруги обумовлюється крутизною хвилі, що набігає на підстанцію, і відстанню між розрядником і трансформатором, що захищається. Цілком ясно, що можливий перепад обмежений імпульсним рівнем ізоляції трансформатора і величиною залишкової напруги при проходженні через нього імпульсного струму блискавки. Гранично припустимий перепад

$$\Delta U_{дон} = U_{и.мп} - U_{PBост},$$

де $U_{и.мп}$ – імпульсний рівень ізоляції трансформатора;

$U_{PBост}$ – напруга, що залишається, на розряднику при нормованому струмі (звичайно 5000 А).

Звідси одержуємо гранично припустиму відстань між розрядником і трансформатором

$$l \leq \frac{U_{и.мп} - U_{PBост}}{2a} v,$$

або, якщо крутизна косокутної хвилі, що набігає, має розмірність кВ/м, то

$$l \leq \frac{U_{u.мп} - U_{PBост}}{2a}$$

Отриманий вираз використовують тільки для найпростіших тупикових підстанцій. На підстанціях із багатьма приєднаннями процес відбиття хвиль значно складніший, тому що відбуваються відбиття від декількох вузлових точок (місце приєднання до шин лінії, апаратів і устаткування підстанцій). В наближених розрахунках і на прохідних підстанціях максимально припустимі відстані між ПВ і трансформатором зв'язують із характеристиками розрядника і ізоляції аналогічним співвідношенням, введенням поправочного коефіцієнта k :

$$l \leq \frac{U_{u.мп} - U_{PBост}}{2a} k. \quad (4.2.5)$$

Значення k приймають рівним 1,25 для прохідної підстанцій із двома лініями і 1,5 – для прохідної підстанцій із трьома лініями, причому при визначенні числа ліній дволанцюгові лінії приймаються за одну (з урахуванням можливості оберненого перекриття відразу на обидва ланцюги при прямому ударі блискавки в опору або трос).

Розрахункову крутизну хвилі, що набігає на підстанцію, визначимо пізніше. Зауважимо тільки, що бажаний прихід на підстанцію хвиль із невеликою крутизою.

Визначення форм і амплітуд перенапруг, що впливають на устаткування реальних підстанцій, є досить складною задачею. Спочатку складається розрахункова схема підстанцій. Заступна схема підстанцій складається з ряду зосереджених ємностей (вхідних ємностей трансформаторів, вимикачів і інших апаратів), відрізків лінії (шин), хвильових опорів інших приєднаних до підстанцій ліній, крім тієї, по якій приходять грозова хвиля, що відтворюють вплив зазначених елементів на процес багатократних відбиттів у реальній схемі. Докладний аналіз перехідного процесу в реальній, навіть дещо спрощеній схемі, складний для аналітичного розрахунку, тому дослідження схем грозозахисту підстанцій проводять на моделях. Прикладом такої моделі є аналізатор грозозахисту підстанцій, за допомогою якого можна одержати так звану криву «небезпечних хвиль». На аналізаторі збирається схема реальної підстанції (рис. 4.2.3,а), причому моделюються спеціальними електронними схемами характеристики розрядників і вольт-секундні характеристики захисної ізоляції. До схеми підводиться імпульсна напруга заданої амплітуди і форми. Реєстрація перехідного процесу проводиться за допомогою осцилографа. Якщо грозові хвилі викликають

пробій ізоляції, то їх називають небезпечними. Грозові хвилі, що викликають перенапруги менші, ніж рівень ізоляції, називають безпечними. Хвиля заданої форми, наприклад, косокутна, характеризується двома параметрами – амплітудою і довжиною фронту або крутизою.

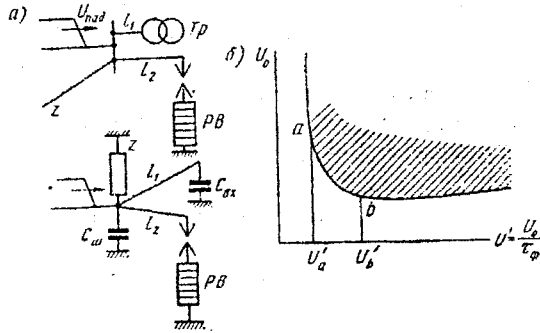


Рис.4.2.3. Еквівалентна схема заміщення підстанції (а), крива небезпечних хвиль підстанції (б)

У координатах «амплітуда-крутизна» кожна хвиля позначається точкою. Існує, очевидно, деяка крива, що розділяє хвилі небезпечні від безпечних. Це і є «крива небезпечних хвиль» підстанції. На рис. 4.2.3,б зображена типова крива небезпечних хвиль, Добре помітні три ділянки кривої:

- 1) крутизна настільки велика, що напруга на ізоляції робиться вищою її імпульсного рівня швидше, ніж спрацює розрядник;
- 2) на ділянці $U'_a - U'_b$ помітний вплив вентильних розрядників, що знижують перепад напруги і тим збільшують припустимі амплітуди набігаючих хвиль;
- 3) на ділянці $U' < U'_a$ (показаній пунктиром) розрядники цілком виявляють свою захисну дію.

Перекриття ізоляції підстанційної апаратури може відбутися тільки за умови, якщо напруга, що залишається на розряднику, буде більшою імпульсного рівня ізоляції. Взагалі це можливо, коли через розрядники проходять дуже великі (значно більші нормованих) імпульсні струми. Проте поява хвиль перенапруги з надмірно великими амплітудами малоімовірна, тому що імпульсний рівень лінійної ізоляції на підході обмежений. Ділянка $U' < U'_a$ з практичної точки зору важлива тому, що визначає мінімальну небезпечну для підстанції крутизну хвиль.

Полога гілка кривої ($U'U'_b$) показує, що при малій амплітуді хвилі будь-якої крутизни є безпечними для ізоляції підстанції. Наявність пологої гілки пояснюється згладжувальною дією смвоостей підстанції на фронт хвилі і малими перепадами напруги.

На основі «кривих небезпечних хвиль» можна раціонально вибрати грозозахист підходів до підстанції, що обмежують амплітуди і крутизни набігаючих хвиль.

Дослідження на аналізаторі грозозахисту дозволяють також оптимально розташувати розрядники на схемі підстанції і уточнити гранично припустимі відстані між РВ і ізоляцією, приблизно за формулою (4.2.5).

Гранично припустимі відстані від об'єкта до вентиляного розрядника іноді називають «зоною захисту вентиляним розрядником». Поза зоною захисту перенапруги можуть перевищувати електричний рівень ізоляції.

4.3. Параметри хвиль, що набігають на підстанцію з лінії

Нормований струм вентиляного розрядника значно менший струму блискавки, що вражає лінію. Для того, щоб захист вентиляним розрядником був ефективний, струм через розрядник не повинний перевищувати 10 кА. Якщо струм через розрядник перевищує цю величину, то, як впливає з попереднього, залишкова напруга зростає, а інтервал між напругою на розряднику і рівнем ізоляції може виявитись недостатнім. Нарешті, якщо струм буде вищим пропускнуої спроможності розрядника, то останній зруйнується. Дуже близькі удари блискавки малоймовірні, тому що підстанція захищається від прямих ударів блискавковододами і має підхід визначеної довжини, захищений тросом. При ударах не ближче 1...2 км струм через вентиляний розрядник залежить від падаючої хвилі, схеми підстанції і числа приєднаних до шин ліній. Для допоміжної схеми рис. 4.1.1, характерної для простих тупикових підстанцій, справедливе співвідношення, що зв'язує припустиму амплітуду падаючої хвилі з нормованими параметрами вентиляного розрядника:

$$U_{над.дон} = \frac{I_{p,z} z + U_{осмРВ}}{2} \quad (4.3.1)$$

Отже, схема підходу повинна обмежувати амплітуди набігаючих хвиль, принаймні до величин, визначених за формулою (4.3.1).

Гранична напруга хвиль, що приходять із лінії, визначається імпульсним рівнем лінійної ізоляції незалежно від того, чи відбувається прямий удар в провід, удар в трос або опору. Якщо блискавка вдарає в

лінію на металевих опорах без троса, то амплітуда хвилі в місці удару згідно з формулою (2.3.1) дорівнює

$$U_1 = \frac{zI_M}{2}.$$

За умови $U_1 > U_{із}$ ізоляція гірлянди перебивається, і напруга на проводі стає приблизно рівною падінню в заземлювачі опори $\approx R_3 I_M$.

При дуже великих струмах блискавки ця напруга може перевищити рівень ізоляції. У цьому випадку може відразу перебитися гірлянда другого проводу, або відбутися перебиття гірлянди тієї ж фази на сусідній опорі. Хвиля при своєму русі буде викликати перебиття гірлянд доти, поки опори заземлень перебитих опор не знизять амплітуду хвилі до розміру розрядної напруги ізоляції. При ударі в опору або трос лінії на металевих опорах напруга в місці зворотного перебиття визначається за формулою (2.7.5), і амплітуда хвилі, що поширюється, спочатку становить величину $\frac{U_{із.ф}}{1-k}$ і не може бути більшою імпульсного рівня фазної ізоляції. Досить великі хвилі можуть приходити по лініях на дерев'яних опорах. Напруга, яка не викликає перебиття міжфазної ізоляції дерев'яної опори, визначається за формулою ($\frac{U_{із.лін}}{1-k}$), і вона завжди більша амплітуди, визначеної за формулою (4.3.1)

Наприклад, для підстанції 110 кВ гранична амплітуда падаючої хвилі

$$U_{над} \leq \frac{I_{p.г} z + U_{остПВ}}{2} = \frac{5 \cdot 400 + 335}{2} = 1167 \text{ кВ},$$

де $I_{p.г}$ – нормований струм розрядника.

Для ліній на металевих опорах рівень лінійної ізоляції для передрозрядного часу $t = 2,5$ мкс при 7хП-4,5 дорівнює 1000 кВ, а при 7хПМ-4,5 становить 820 кВ, тобто менший граничної амплітуди падаючої хвилі.

Для ліній на дерев'яних опорах $\frac{U_{із.лін}}{1-k} = 2500$ кВ, тобто значно більше граничної амплітуди падаючої хвилі.

Отже, для ліній на металевих або залізобетонних опорах не потрібні особливі заходи для обмеження набігаючих хвиль на підході до підстанції. Проте, якщо до підстанції підходять лінії на дерев'яних опорах без тросів, то на початку підходу треба встановити захисні проміжки, або трубчасті розрядники.

При виконанні підходу на дерев'яних опорах із тросом спуски, що заземлюють, істотно знижують ізоляцію опори відносно землі. В ізоляцію

входить частина дерев'яної траверси до стійки і одна гірлянда. Так для лінії 110 кВ рівень ізоляції на землю складає 850...900 кВ, що приблизно стільки ж, скільки для ліній на металевих опорах без троса, і приблизно в три рази менше, ніж для дерев'яних опор ліній тієї ж номінальної напруги.

Для того, щоб захисний підхід не погіршував грозостійкість лінії, доцільно ставити для захисту опор на початку підходу комплекти трубчастих розрядників.

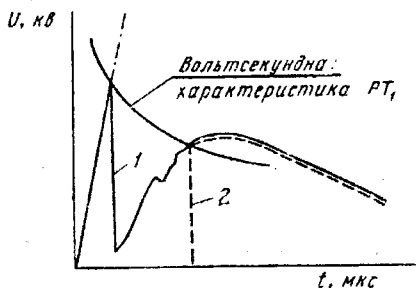


Рис. 4.3.1. Хвилі, що підходять до підстанції, яка має на підході РТ

При установленні трубчастих розрядників форма хвилі, що проходить по підході на підстанцію, є коротким зрізаним піком, який обумовлений вольт-секундною характеристикою трубчастого розрядника за малого передрозрядного часу, і зростанням залишкової напруги за рахунок індуктивності спуску і опору заземлення опори (рис. 4.3.1, крива 1). Незважаючи на значну амплітуду, зрізаний пік істотної ролі не грає, тому що практично він цілком загасає внаслідок імпульсної корони. Більш небезпечною є повна хвиля зі стрімким фронтом, що може утворитися при великих струмах блискавки на іншій фазі після спрацювання трубчастого розрядника цієї фази під впливом падіння напруги в заземлювачі (крива 2). Таку ж форму мають хвилі, що виникають на проводах у результаті зворотних перекриттів з опори на провід після удару блискавки в опору або трос. Тому підхід повинний забезпечувати не тільки обмеження амплітуди падаючої на підстанцію хвилі, але і розтягування її фронту до безпечної величини.

4.4. Нормальна схема захисту підстанцій від набігаючих хвиль

Нормальна схема захисту підстанції 35...220 кВ від набігаючих хвиль, дана на рис. 4.4.1. Показані два характерні випадки: лінія без

троса з захищеним підходом і лінія захищена тросом по всій довжині. В другому випадку відпадає необхідність у будь-яких спеціальних заходах грозозахисту на підході, якщо опори заземлювачів опор не

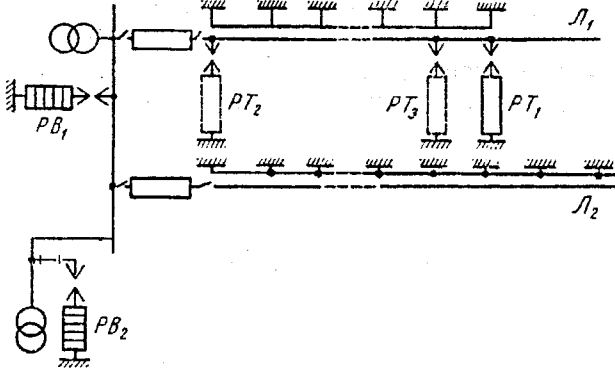


Рис. 4.4.1. Нормальна схема захисту підстанції від набігаючих хвиль

перевищують нормованих ПУЕ (10 Ом змінному струму для ґрунтів з $\rho = 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$). В межах одного-двох кілометрів треба особливо ретельно підвісити троси. На уніфікованих дволанцюгових опорах з одним тросом можливий прорив поза тросовим захистом (можливість приблизно 1%). При близькому ударі струм блискавки буде розподілятися внаслідок багатократних відбиттів між опором вентиляного розрядника і опором заземлення опори. Струм у вентиляльному розряднику $I_p = I_M \frac{R_3}{R_3 + R_{PB}}$ може бути значно більшим нормованого. Схеми захисту підстанції не розраховуються на цей випадок, але можна вважати, малоімовірним руйнування розрядника і перекриття ізоляції підстанційної апаратури. Так, для розрядників 110 кВ пропускна спроможність становить 20кА. Опір вентиляльного розрядника для нормованого струму 10 кА складає $\frac{U_{ост}}{I_p} = \frac{361}{10} \approx 40 \text{ Ом}$. При опорі заземлення опори 10 Ом струм в розряднику буде неприпустимим при близьких проривах блискавки з струмом I_M більшим 100 кА.

Хоча ймовірність таких струмів разом з ймовірністю прориву поза тросом незначна, немає гарантії, що вентиляльний розрядник ніколи не ушкодиться і ніколи не відбудеться перекриття ізоляції підстанційної апаратури.

На лініях із дерев'яними опорами без троса на початку захищеного підходу обов'язково встановлюються трубчасті розрядники. Якщо опір заземлення опори приблизно 10 Ом, то встановлюється один комплект PT_1 , якщо ґрунт не дозволяє зробити таке заземлення, то додатково через два прогони встановлюється комплект PT_3 .

Зовнішні проміжки PT_1 і PT_3 вибираються рівними 400...500 мм на 110 кВ, 100...120 мм на 35 кВ, тому розрядні напруги при повній хвилі нижчі значень, обумовлених припустимими амплітудами хвиль, що прямують на підстанцію, і при нормально виконаних підходах струми у вентиляльних розрядниках дуже рідко перевищують нормовані величини, тобто розрядники використовуються не часто. Проте немає причин збільшувати зовнішні проміжки вище зазначених величин, щоб забезпечити відстроювання від комутаційних перенапруг і від ковзних розрядів по трубці при зниженні в експлуатації мокророзрядних напруг розрядників. Якщо підхід виконується на металевих опорах, потреба в PT_1 відпадає.

На підстанціях, де струми короткого замикання перевищують верхню межу струмів, що розриваються трубчастими розрядниками, PT_1 і PT_3 не встановлюються. Замість розрядників на підходах ліній на дерев'яних опорах ставлять захисні проміжки. При цьому треба мати на увазі, що хоча амплітуди падаючих хвиль не перевищують критичних, обумовлених формулою (4.3.1), крутизна набігаючих хвиль підвищена, і тому припустимі відстані між РВ і апаратурою будуть меншими, ніж у випадку встановлення комплектів PT_1 . Крім того, відсутність PT_1 призводить до збільшення числа грозових відключень лінії на дерев'яних опорах: за нашими підрахунками додаткове число відключень лінії 110 кВ довжиною 100 км складає приблизно 0,8 за рік.

Іноді замість PT_1 на початку підходу ставлять вентиляльний розрядник і на відстані 500 м на лінії - ще іскровий координуючий проміжок, що дозволяє зменшити імпульсні струми в РВ при ближніх прямих ударах блискавки.

Розрядна напруга координуючого проміжку повинна бути близько 1000...2000 кВ.

Комплект розрядників PT_2 встановлюється для захисту розімкнутих лінійного вимикача і роз'єднувача. За рахунок відбиття від розімкнутого кінця імпульсна напруга на вводі трансформатора може подвоїтись і виникає небезпека перекриття ізоляції вводу і навіть переносу перенапруги на підстанцію. При включеній лінії спрацьовування PT_3 не бажане, тому що зріз напруги, що виникає, може викликати високочастотні коливання в обмотках трансформатора, небезпечні для поздовжньої (міжкатушкової)

ізоляції. Розрядники РТ₂ повинні входити в зону захисту вентиляними розрядниками підстанції. РТ₂ встановлюють на кінцевій опорі далеко від РВ, тому важко здійснити належну координацію.

Розміщення вентиляних розрядників на підстанції виконується з урахуванням «зон захисту». Гранично припустимі відстані від РВ до трансформаторів розраховуються за формулами (4.2.4) і (4.2.5).

Для типових підстанцій можна скористатися рекомендаціями, наведеними в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Номінальна напруга, кВ	Довжина підходу, км	Відстань до трансформатора, м					
		тип підстанції		з двома постійно підключеними повітряними лініями		з трьома постійно підключеними повітряними лініями	
		тупикова підстанція					
		тип опори					
		дерев'яна	металева	дерев'яна	металева	дерев'яна	металева
35	1,5...2	40...80	30	120...150	40...90	150...200	40...100
		80	30	150	90	200	100
110	По всій довжині трос	50...80	35	145...170	60	170	170
	80	50	170	90	170	170	
220	При РВС	По всій довжині трос	-	55	-	75	-
	При РВМГ	По всій довжині трос	-	125	-	135	-

Відстані до апаратів встановлюють на 25...100% більші. Вентильні розрядники встановлюються звичайно на шинах так, щоб відстань від РВ до віддаленішого трансформатора або апарата залишалась в допустимих межах. Іноді при великих відстанях від шин до трансформаторів (наприклад, на гідростанціях, де трансформатори розміщують на нижньому б'єфі греблі, а розподільні пристрої на березі) треба встановлювати додаткові комплекти РВ. Якщо є декілька систем шин або секцій, то РВ обов'язкові на кожній системі або секції, тому що можлива їх роздільна робота. Вентильні розрядники включають без роз'єднувачів, тому поєднують ревізію РВ із ревізією всього приєднання.

4.5. Оцінка грозостійкості підстанції

Грозостійкість підстанцій, як і ліній, характеризують ймовірним числом років безаварійної роботи або технічним показником грозостійкості. Підстанції, як і лінії, не можна зробити абсолютно грозостійкими, та й економічно це було б недоцільним. Проте намагаються обмежити число аварійних відключень підстанцій. Для ліній питомий показник грозостійкості одне вимикання за рік вважається прийнятним. Для підстанції такий показник неприйнятний. Кожне перекриття ізоляції на підстанції призводить до короткого

замикання на шинах і розвивається до важкої системної аварії навіть при сучасних засобах релейного захисту і системної автоматики.

Крім того, внаслідок старіння внутрішньої ізоляції, порушується координація її з зовнішньою ізоляцією підстанційної апаратури і при великих перенапругах може відбутися не перекриття по поверхні прохідних ізоляторів, а пробій внутрішньої ізоляції. Наприклад, відбувається електричний пробій обмоток, що потребує тривалого ремонту або заміни трансформатора в цілому.

Для сучасних підстанції технічний показник грозостійкості досягає десятків і навіть сотень років.

Розглянемо наближену оцінку показника грозостійкості. Вважаємо, що від прямих ударів блискавки підстанція захищена надійно, і перекриття ізоляції можуть бути викликані тільки приходом до підстанції небезпечних хвиль перенапруги з лінії. Практично цікаві два випадки:

1) показник грозостійкості підстанції заданий, і потрібно визначити гранично припустимі відстані від трансформаторів до вентиляльних розрядників (зони захисту розрядниками);

2) при даній схемі установки розрядників на підстанції потрібно визначити її грозостійкість.

Перший випадок

Визначення зони захисту вентиляним розрядником зводиться до визначення розрахункової крутизни набігаючої хвилі із лінії на підстанцію, у відповідності з формулою (4.2.4). Якщо перенапруга на проводі виникає внаслідок зворотного перекриття, то фронт початкової хвилі в місці удару прямокутний $a_0 \rightarrow \infty$. При русі хвилі по лінії через втрати на імпульсну корону фронт розтягується. Після пробігу відстані l фронт хвилі має крутизну:

$$a = \frac{1}{Bl}, \text{ кВ/м.}$$

Ця формула не зовсім точна, оскільки вона не зв'язує крутизну деформованої хвилі з її амплітудою, яка залежить від імпульсного рівня ізоляції лінії. Одночасно із ростом номінальної напруги лінії коефіцієнт B знижується і, отже, крутизна зростає.

Очевидно, для того, щоб фронт розтягнувся до безпечної крутизни, хвиля повинна пройти визначену відстань. Позначимо її через $X_{сп}$. Нехай до підстанції підходять декілька ліній, захищених тросом по всій довжині. Хвилі перенапруги можуть виникати тільки в результаті прориву блискавки на проводи або зворотних перекриттях.

Як впливає з формули (2.7.10), питома число перекриттів лінійної ізоляції на 100 км лінії і 20 грозових днів дорівнює:

$$n_{пер} = 1,8/t \left[g_a g_i + \frac{1}{2} (g_{i1} + g_{i2}) \right],$$

а на один кілометр і на один грозовий день $\frac{1}{100} \cdot \frac{1}{20} n_{пер}$.

Всі удари в лінію далі $X_{кр}$ призводять до безпечних перенапруг на підстанції. Отже, при числі приєднаних ліній p очікується за грозовий день прихід на підстанцію такої кількості небезпечних хвиль $-\frac{pX_{кр}n_{пер}}{100 \cdot 20}$.

Практично кожне перекриття ізоляції на підстанції спричиняє її відключення. Отже, відключень за рік очікується

$$pX_{кр} \frac{n_{пер}}{100} \cdot \frac{D}{20} = \frac{1}{m}.$$

Звідси критична довжина пробігу

$$X_{кр} = \frac{100 \cdot 20}{n_{пер} Dmp}. \quad (4.5.1)$$

Розрахункова крутизна хвиль на підстанції

$$a = \frac{1}{BX_{кр}} \text{ кВ/м}. \quad (4.5.2)$$

Приклад 4.1. Розрахуємо граничну відстань між РВ і трансформатором на підстанції 110 кВ, до якої підходять три лінії на металевих опорах із тросом. Імпульсний рівень ізоляції трансформатора при зрізаній хвилі становить 550 кВ.

Залишкова напруга на розряднику РВС-110 при струмі 5 кА дорівнює 335 кВ. Показник грозостійкості підстанції m повинен бути не менше 100 років. Грозова діяльність у районі підстанції 30 днів.

За даними прикладу (2.2) питома кількість перекриттів лінійної ізоляції $0,884/0,7 = 1,26$.

За формулою (4.5.1) знаходимо критичну довжину пробігу

$$X_{кр} = \frac{100 \cdot 20}{1,26 \cdot 30 \cdot 100 \cdot 3} = 0,7 \text{ км}.$$

Звідси розрахункова крутизна хвилі на підстанції

$$a = \frac{1}{BX_{кр}} = \frac{1}{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 700} = 2,86 \text{ кВ/м}.$$

За формулою (4.2.5) гранична відстань між РВ і трансформатором

$$l = \frac{U_{н.пр} - U_{РВост}}{2a} k = \frac{550 - 335}{2 \cdot 2,86} 1,5 = 56,5 \text{ м.}$$

Коли до підстанції підходять лінії на дерев'яних опорах, захищені тросом тільки на підходах, то при визначенні розрахункової крутизни у формулу (4.5.2) можна підставляти фактичну довжину підходу, якщо вона має не більше значення, ніж обумовлене формулою (4.5.1).

Другий випадок

Якщо відстань між розрядником і трансформатором відома, то треба визначити розрахункову крутизну хвиль на підстанції і критичну довжину пробігу $X_{кр}$. Число небезпечних хвиль, що виникли на відстані від підстанції меншій ніж $X_{кр}$, дорівнює

$$pX_{кр} \frac{n_{пер}}{100} \cdot \frac{D}{20}$$

Звідси показник грозостійкості

$$m = \frac{100 \cdot 20}{n_{пер} D X_{кр} p} \quad (4.5.3)$$

Приклад 4.2. До тупикової підстанції 110 кВ приходить лінія на дерев'яних опорах. Захищений підхід має довжину 1,5 км і виконаний, як зазначено в прикладі (2.5). Між трансформатором і розрядником РВС-110 відстань 90 м. Визначимо показник грозостійкості підстанції ($D=30$ днів).

З (4.2.5) розрахункова крутизна наближаючих хвиль

$$a \leq \frac{550 - 335}{2 \cdot 90} 1 = 1,19 \text{ кВ/м.}$$

Критична довжина пробігу

$$X_{кр} \leq \frac{1}{Ba} = \frac{1}{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,19} = 1680 = 1,68 \text{ км,}$$

тобто перевищує фактичну довжину підходу. Тому при розрахунку числа небезпечних хвиль на підстанції розмежуємо хвилі, що виникають при ударі в підхід 1,5 км і в незахищену частину за підходом 0,18 км.

За даними прикладу (2.5) число небезпечних хвиль при ударі в підхід

$$1,8 \frac{1}{100} h \frac{D}{20} \left(g_{\alpha} g_{\beta} + \frac{1}{2} (g_{\Pi}) \right) = 1,5 \frac{1,8}{100} \cdot \frac{30}{20} \left(0,7 \cdot 0,0112 + \frac{1}{2} 0,0437 \right) = 0,0202,$$

при ударі в незахищену ділянку

$$\frac{0,18 \cdot 1,8 \cdot 10}{100} \cdot \frac{30}{20} \cdot 0,7 = 0,034.$$

Усього небезпечних хвиль у рік

$$0,0202 + 0,034 = 0,0542.$$

Технічний показник грозостійкості

$$m = \frac{1}{0,0542} = 18,5 \text{ років.}$$

Ясно, що при даній установці вентиляного розрядника довжина захищеного підходу недостатня. Якщо підхід має довжину не меншу 1,68 км, то число небезпечних хвиль знижується до $0,0202 \cdot \frac{1,68}{1,5} = 0,0226$, а показник грозостійкості зростає до 44,5 роки.

Грозостійкість підстанції також зростає, якщо переставити вентиляний розрядник ближче до трансформатора.

4.6. Захист розземленої нейтралі трансформаторів

В мережах 110 кВ для зниження струмів однофазного короткого замикання або за умовами роботи релейного захисту у частини трансформаторів може бути розземленою нейтраль. За даними експлуатації приблизно 30-35% трансформаторів 110 кВ працюють з ізольованою нейтраллю.

Оскільки більшість трансформаторів працюють з ефективно заземленою нейтраллю, в свій час було вирішено знизити ізоляцію нейтралі. Зниження рівня ізоляції нейтралі було необхідним і для того, щоб збільшити випуск трансформаторів із регулюванням під навантаженням. Знижена ізоляція нейтралі трансформаторів 110 кВ відповідає класу ізоляції 35 кВ. Тому ізоляція нейтралі може піддаватися небезпечним перенапругам при хвилях, припустимих для лінійного кінця обмотки.

Як відомо, при приході до трансформатора крутої хвилі U_0 з нескінченною довжиною, на ізольованій нейтралі виникає перенапруга, теоретично рівна $2U_0$ при падінні хвиль по трьох фазах і $\frac{2}{3}U_0$ при падінні хвилі тільки по одній фазі. Проте в дійсності треба рахуватися з тим, що довжина хвилі перенапруги обмежена (τ_b того ж приблизно порядку, що і період T основної частоти власних коливань обмотки) і з тим, що є згасання перехідного процесу коливань, тому величина перенапруг

дорівнює $U = U_0 \varphi$, де функціональний коефіцієнт $\varphi = f\left(\frac{\tau_B}{T}\right)$ може досягти граничної величини 1,8 - 1,9.

Імпульсна випробувальна напруга ізоляції нейтралі дорівнює 180 кВ. Отже, для ізоляції нейтралі небезпечними є хвиля 300 кВ при дії на одну фазу і 100 кВ при дії відразу на три фази.

Небезпечно для ізоляції нейтралі хвилі можуть виникати і при ударах блискавки в лінію і при близьких ударах.

Оцінимо можливість виникнення небезпечних хвиль на тупиковій підстанції 110 кВ із лінією на дерев'яних опорах без треса.

Імпульсна пробивна напруга розрядника 285 кВ, тому небезпечна хвиля 300 кВ може проникнути в обмотку тільки при спрацюванні фази вентильного розрядника на шинах підстанції. За вольт-амперною характеристикою РВС-110 залишкової напрузі на розряднику 300 кВ відповідає струм через розрядник 2 кА. Отже, падаюча на підстанцію хвиля повинна бути (за формулою 4.3.1) не менша

$$U_{над} \geq \frac{zI_p + U_{ост}}{2} = \frac{400 \cdot 2 + 300}{2} = 550 \text{ кВ.}$$

Хвиля такої амплітуди виникає при прямому ударі блискавки в лінію, якщо її струм буде більшим

$$I_M = \frac{2U}{z} = \frac{2 \cdot 550}{400} = 2,75 \text{ кА}$$

(у перерахунку на удар у ідеально заземлений об'єкт $I_0 = 5,5$ кА), причому ймовірність цього струму дорівнює 90%. Але амплітуда набігаючої хвилі обмежена трубчастим розрядником, встановленим на початку підходу, або імпульсним рівнем ізоляції опор підходу. В разі відсутності комплексу PT_1 на підході, виконаному на дерев'яних опорах із тросом, імпульсний рівень ізоляції опори при негативній полярності і повній хвилі дорівнює 985кВ.

Така хвиля створюється струмом блискавки не меншим

$$I_M \geq \frac{2 \cdot 985}{400} = 4,975 \text{ кА,}$$

або в перерахунку на удар в ідеально заземлений об'єкт $I_0 = 9,85$ кА, причому ймовірність такого струму $\vartheta = 68,5\%$. Після перекриття ізоляції на опорі на початку підходу амплітуда хвилі, що рухається до підстанції різко знижується і хвиля стає безпечною. Ось чому, для ізоляції нейтралі

будуть небезпечні тільки струми блискавки в інтервалі $5,5\text{kA} \leq I_M \leq 9,85\text{kA}$. При числі ударів у лінію за рік $N = 1,8h = 18$ (100 км, 20 грозових днів, висота лінії 10 м) одержуємо $18(0,9-0,685) = 3,87$ випадків небезпечних хвиль на підстанції за рік.

Визначити число небезпечних хвиль, обумовлених індукованими перенапругами, не так просто. Формула (2.6.5) дає можливість визначити кількість індукованих перенапруг заданої амплітуди. На жаль, зв'язок між перенапругою на нейтралі і довжиною діючої хвилі не визначений, а довжина хвилі індукованої перенапруги дуже залежить від відстані до точки удару на лінії (див. рис. 2.6.2).

Небезпечна амплітуда 100 кВ відноситься до порівняно довгих хвиль. Тому, якщо у формулу (2.6.5) підставити небезпечну перенапругу $2U_H = 110$ кВ, то одержимо перебільшене число очікуваних небезпечних хвиль. Приблизна кількість небезпечних випадків за рік

$$N = \frac{23,4 \cdot Dh}{U_H} e^{-\frac{U_H}{260}} = \frac{23,4 \cdot 20 \cdot 10}{50} e^{-\frac{50}{260}} = 77.$$

Незважаючи на відносність результатів цього розрахунку, цілком очевидно, що можливість аварій, викликаних ушкодженням ізоляції нейтралі, неприпустимо висока. Звернемо увагу, що найбільшу небезпеку несуть індуковані перенапруги. Можливість виникнення небезпечних індукованих перенапруг залежить від числа ліній, приєднаних до шин підстанції.

Для підстанції з лінією без троса кількість небезпечних хвиль складає 60, а для підстанції із двома лініями тільки 3,8. При шести лініях можливість неприпустимих хвиль на нейтралі стає малою.

Для ліній із тросом індуковані перенапруги безпечні, але залишаються небезпечними прямі удари блискавки в лінію, хоча можливість ушкодження різко знижується. Трансформатори, що працюють з ізолюваною нейтраллю, обов'язково повинні мати захист нейтралі і апаратів, включених в нейтраль.

Розземлену нейтраль трансформаторів 110 кВ треба захищати спеціальним вентиляним розрядником або скомплектованим із двох елементів РВС-20.

В мережах 35 кВ ізолювана нейтраль трансформаторів захищається розрядником, розрахованим на максимальну робочу напругу на лінійному кінці, поділену на $\sqrt{3}$. При вмиканні у нейтраль дугогасильної котушки установка розрядника обов'язкова. В мережах 220...500 кВ широке застосування знайшло регулювання напруги під навантаженням за допомогою вольтододаткових

автотрансформаторів в нейтралі. Для захисту ізоляції вольтододаткового трансформатора між кінцем і початком обмотки кожної фази включається вентильний розрядник, розрахований на максимальну робочу напругу. Оскільки межі регулювання $\pm 10\%$, то розрядник вибирається на $0,1$ максимальної робочої напруги на лінійному вводі трансформатора.

4.7. Особливості захисту підстанцій з автотрансформаторами

Захист підстанцій з автотрансформаторами має деякі особливості в порівнянні з захистом підстанцій із трансформаторами, обумовлені переходом хвиль між обмотками, що мають і електричний і електромагнітний зв'язок. Це змушує встановлювати вентильні розрядники на вводах всіх обмоток. Дуже важливо підкреслити, що вентильний розрядник повинен бути присланий до обмотки без комутаційних елементів. Особливо небезпечна дія хвилі перенапруги, яка приходить на обмотку середньої напруги при розімкнутій обмотці високої напруги. Перехідний процес в обмотці для цього випадку розвивається в такий спосіб.

Вздовж обмотки середньої напруги початковий і кінцевий розподіл напруги буде таким же, як для обмотки з заземленою нейтраллю при падінні на неї крутої хвилі. У розімкнутій обмотці високої напруги створюється розподіл напруги, як у трансформаторі з ізолюваною нейтраллю. Крім того, оскільки по обмотці середньої напруги може проходити примусовий струм (що замикається через заземлену нейтраль), на обмотці високої напруги буде також наводитися напруга $U_0(k-1)$ з лінійним розподілом, де k – коефіцієнт трансформації. Отже, на розімкненому ввіді високої напруги гранично може бути напруга

$$U = U_{\text{кон}} + U_{\text{кол}} = 2U_{\text{кон}} - U_{\text{нач}} \approx 2[U_0 + U_0(k-1)] \approx 2kU_0.$$

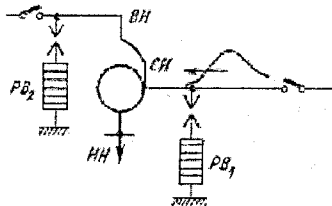


Рис.4.7.1. Захист автотрансформатора

Хвиля з боку обмотки середньої напруги обмежена вентиляним розрядником, тому на ввіді високої напруги виникає перенапруга, небезпечна для головної ізоляції.

Розглянемо захист автотрансформатора 220/110/10 кВ (рис.4.7.1). На ввіді обмотки 110 кВ установлений розрядник РВС-110. На обмотку діє хвиля, рівна приблизно 355 кВ. Навіть якщо вважати, що напруга не досягне $2kU_0 = 4U_0$, а через згасання і обмеженість довжини хвилі не перевищить $3U_0$, то і тоді на обмотці 220 кВ виявиться напруга ≈ 1000 кВ, у той час, як випробувальна напруга цієї обмотки 945 кВ (при повній хвилі). З боку обмотки 220 кВ потрібно мати вентиляний розрядник. Що стосується припустимих відстаней між автотрансформаторами і вентиляними розрядниками, то вони визначаються так само, як і в схемах із трансформаторами. Зменшувати граничні відстані не треба, тому що робота РВ від розвитку коливань в обмотках не залежить: ріст напруги на обмотці, обумовлений процесом власних коливань, йде відносно повільно (у середньому період основної частоти обмотки складає 50...100 мкс, а питання про спрацювання вентиляного розрядника вирішується протягом декількох мікросекунд).

4.8. Загальні міркування про грозозахист підстанцій

1. Останнім часом намітилася тенденція до спрощення схем захисту підстанцій від набігаючих хвиль, що стало можливим у результаті випуску промисловістю вентиляних розрядників із поліпшеними захисними характеристиками і узагальнення досвіду експлуатації.

Зокрема, пропонується застосовувати не 80%, а 70 і 75% розрядники для мереж з ефективно заземленою нейтраллю з меншими залишковими напругами, що дасть більш економічне вирішення більшості схем. Комплектування розрядників для систем 110 і 220 кВ на напругу $1,4U_\phi$ (або 80% лінійної напруги) виходить із досить важкого розрахункового випадку дуже великих опорів нульової послідовності на шинах підстанцій. В дійсності ж більшість трансформаторів і всі автотрансформатори 110 кВ, усі трансформатори й автотрансформатори 220 кВ мають ефективно заземлену нейтраль, і напруга на здорових фазах надзвичайно рідко перевищує 0,7-0,75 номінальної. До того ж треба зазначити, що перебільшувати можливість збігу спрацювання вентиляного розрядника на одній фазі і одночасно на короткому замиканні на землю на іншій фазі навряд чи доцільно.

2. На підстанціях із великою кількістю приєднаних ліній у деяких випадках можна взагалі відмовитися від установки вентиляних розрядників.

Хвильові опори ліній на шинах, крім тієї, по якій приходять хвиля грозової перенапруги, відбирають струм хвилі і знижують амплітуду перенапруги. При загальній кількості приєднаних ліній p коефіцієнт заломлення для спадної хвилі дорівнює $\frac{2}{p}$ і, отже, напруга на шинах

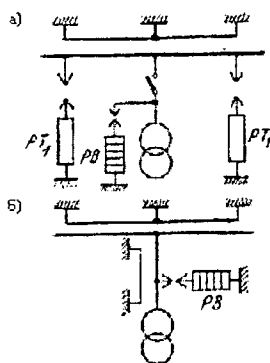


Рис.4.8.1. Спрощені схеми захисту підстанцій на відпайці

$U = \frac{2U_{над}}{p}$ тим менша, чим більше підключено ліній. Наприклад, до підстанцій 110 кВ постійно протягом грозового сезону приєднано п'ять ліній на металевих опорах із тросом. Напруга падаючої хвилі, обмежена імпульсним рівнем лінійної ізоляції, не може бути більшою 770 кВ. На шинах буде тільки 308 кВ, в той час, як випробувальна напруга підстанційної апаратури дорівнює 425 кВ. Але, звичайно, приймати рішення про відмову від установки вентильних розрядників потрібно дуже продумано, маючи на увазі, що ймовірність приходу до підстанцій небезпечних хвиль внаслідок проривів поза тросом збільшується при більшій кількості ліній на шинах, і показник грозостійкості може стати недостатнім.

3. Підстанції 35...110 кВ без вимикачів на відпайках від ліній захищають за спрощеними схемами. Вентильні розрядники встановлюються якнайближче до трансформатора, тобто не далі, ніж на 10 м, тому що захищений підхід може бути не більшим 150...200 м. На початку підходу з боку лінії варто встановлювати трубчасті розрядники (рис. 4.8.1,а).

За наявності тросів на лінії, від якої живиться підстанція на відпайці, немає потреби встановлювати трубчасті розрядники

(рис.4.8.1,б). Трубчасті розрядники не встановлюються також при відпайках від ліній на металевих або залізобетонних опорах.

Контрольні запитання

1. В чому полягає принцип грозозахисту розрядником?
2. Які основні характеристики вентильного розрядника?
3. Які критерії грозостійкості підстанцій?

РОЗДІЛ 5. ГРОЗОЗАХИСТ ОБЕРТОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Оберткові електричні машини (генератори, синхронні компенсатори, двигуни) звичайно не приєднуються безпосередньо до шин, до яких приходять повітряні лінії. Шини з приєднаними обертовими машинами пов'язані з лініями електропередачі трансформаторами. Трансформатори разом з іншими апаратами підстанцій достатньо надійно захищаються від хвиль, що приходять із ліній, грозозахисними розрядниками. Перехід блукаючих хвиль через обмотки трансформаторів на шини генераторної напруги шляхом ємнісної і електромагнітної передачі надзвичайно рідко може призвести до перенапруг, небезпечних для ізоляції машин.

Проте в окремих випадках з різних причин не можна відмовитися від приєднання обертових машин до повітряних ліній. Тоді ізоляція обертових машин повинна захищатися від хвиль атмосферних перенапруг, що набігають із ліній. Захист обертових машин, здійснюваний вентильними розрядниками, ускладнюється нижчим порівняно з трансформаторами імпульсним рівнем ізоляції. Коефіцієнт імпульсу головної ізоляції обертової машини близький до одиниці. Таким чином, припустимі перенапруги між обмоткою і корпусом не повинні бути більшими випробувальних напруг, прийнятих в експлуатації. Випробувальні напруги в експлуатації приймаються нижче заводських ($2,2U_{ном}$), оскільки враховується старіння ізоляції. Для машин 6...10 кВ випробувальні напруги складають $1,5 - 1,7U_{ном}$. Розрядники серії РВВМ знижують перенапруги до рівня заводських випробувальних напруг. Характеристики розрядників нової серії РВМ із магнітним гасінням дуги супровідного струму набагато кращі, але і вони забезпечують зниження перенапруг до рівня випробувальних напруг тільки при струмах, менших нормованих.

Наведемо дані по залишкових напругах вентильних розрядників для захисту обертових машин 3,6 і 10 кВ.

Таблиця 5.1

Номінальна напруга, кВ. еф.	Гарантований імпульсний рівень, кВ макс	Залишкова напруга, не більша, кВ макс		
		при струмах		
		1500 А	2000 А	5000 А
3	10	10	11(9,5)	12
6	21	19	21(18)	22,5
10	32,5	32	35(30)	37,5

Примітка. Значення залишкових напруг наведені для розрядників РВВМ і РВМ (для останніх в дужках).

Порівнюючи дані таблиці з величинами випробувальних напруг бачимо, що висока надійність схем грозозахисту може бути забезпечена

тільки при дуже глибокому зниженні амплітуди падаючої хвилі шляхом відповідного обмеження її на підході.

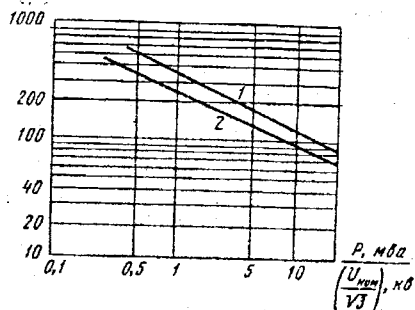


Рис. 5.1. Хвильові опори обмоток обертових машин: 1 – рух хвилі по одній фазі; 2 – рух хвилі по трьох фазах

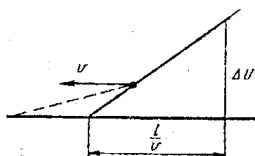


Рис. 5.2. Рух хвилі по обмотці

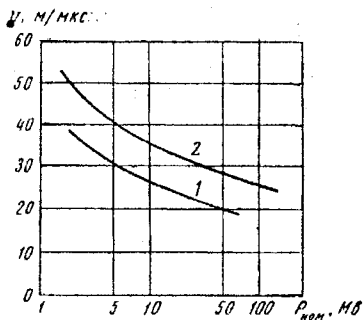


Рис. 5.3. Швидкість розповсюдження хвилі в обмотках машин: 1 – рух хвилі по одній фазі; 2 – рух хвилі по трьох фазах

Імпульсний рівень ізоляції ліній 6...10 кВ складає приблизно 100 кВ для ліній на залізобетонних опорах і 1500 кВ (відносно землі) для ліній на дерев'яних опорах. Як і у випадку захисту підстанційної апаратури,

найбільші труднощі виникають при захисті обертових машин, безпосередньо пов'язаних із лініями на дерев'яних опорах. Щоб обмежити амплітуди хвиль, що падають на обмотки машин, здійснюється послідовний зріз хвилі перенапруги за допомогою іскрових проміжків і трубчастих розрядників. При цьому, якщо вдасться досягти правильної координації вольт-секундних характеристик трубчастих розрядників і узгодженого їх спрацювання, струм у вентильному розряднику, установленому на шинах, буде невеликим, і залишкова напруга на розряднику виявиться меншою від небезпечної для ізоляції машини. Далі розглянемо приклади схем грозозахисту машин.

Рівень поздовжньої ізоляції обертових машин дещо більший, ніж головної; коефіцієнт імпульсу для поздовжньої ізоляції складає не більше 1,2 і треба вжити заходів для обмеження перенапруг на витковій або міжкотушковій ізоляції.

У розрахунках перенапруг обмотку обертової машини приблизно заміняють ділянкою лінії з деяким хвильовим опором, тому що електромагнітний зв'язок між котушками обмотки дуже слабкий. Обмотка є проводом лінії, а зворотним «проводом» служить сталь статора. Усереднені хвильові опори обмотки залежать від конструкції машини і її номінальної напруги і потужності. Хвильові опори збільшуються із зниженням ємності обмотки і зростанням її індуктивності, тобто хвильові опори з тим більші, чим менша номінальна потужність машини і більша номінальна напруга (рис. 5.1).

Через поверхневий ефект у сталі імпульсний струм витісняється до поверхні паза, що веде до інтенсивного згладжування і згасання хвилі. Початок фронту хвилі сильно деформується і практично початком хвилі вважається точка, де вже починається підйом напруги (рис. 5.2). Фазова швидкість просування цієї точки істотно менша швидкості поширення світла в даному середовищі (ізоляції) і з ростом потужності генератора (машини) падає (рис. 5.3).

5.1. Захист виткової ізоляції

Якщо не враховувати слабкий ємнісний зв'язок через міжвиткову ємності, то напруга на ізоляції витка довжиною l при русі по обмотці хвилі з крутизою a (кВ/мкс) дорівнює

$$\Delta U = \frac{al}{v} \text{ кВ макс,}$$

де v – швидкість поширення хвилі.

Прирівнюючи ΔU до випробувальної напруги виткової ізоляції, помноженої на $\sqrt{2}$ і коефіцієнт імпульсу 1,2, одержимо значення припустимої крутизни хвилі, що падає на обмотку

$$a \leq \frac{1,2\sqrt{2}U_{исп}}{l} \cdot v. \quad (5.1.1)$$

Розрахунок показує, що навіть для малопотужних багатовиткових машин, припустима крутизна не менша 3 кВ/мкс, а для більшості випадків не менша 5...6 кВ/мкс.

5.2. Захист нейтралі

На ізольованій нейтралі обертової машини при падінні хвилі перенапруги одночасно по всіх трьох фазах напруга за рахунок відбиття може зрости (теоретично) до подвійного розміру. Це для хвилі із прямокутним фронтом. Для хвилі із згладженим фронтом підвищення потенціалу нейтралі залежить в основному від співвідношення між періодом власних коливань обмотки і довжиною фронту (або крутизною) падаючої хвилі. Розрахунки показали, що для захисту нейтралі крутизна хвилі повинна бути обмежена до 2кВ/мкс, тобто обмежена більше, ніж потрібно для захисту поздовжньої ізоляції.

Якщо схема захисту з смістю на шинах не згладжує хвилю до такої крутизни, то нейтраль захищається або установкою вентиляного розрядника, або заземлюється через порівняно великий омичний опір (відносно струмів замикання нейтраль залишається практично розземленою). Рекомендують для захисту включати в нейтраль опір $R_0 = 2z$ для машин 6 кВ і $R_0 = 2,5z$ для машин 10 кВ, де z – хвильовий опір обмотки.

5.3. Розрахунок схеми захисту з повітряним підходом

Вихідними даними розрахунку є: амплітуда і довжина хвилі розрахункового струму блискавки, вольт-секундні характеристики вентиляльних і трубчастих розрядників, опір заземлень грозозахисних пристроїв (а також опір самозаземлення блискавки для оцінки амплітуд хвилі при далеких ударах).

Вибір довжини захищеного підходу і місця установки розрядників є метою розрахунку.

Згідно з нормами захищений підхід повинен мати рівень грозостійкості не менше 50 кА. Схеми грозозахисту рекомендується розраховувати на цю величину струму блискавки. Опір

самозаземлення блискавки (удар просто в ґрунт) оцінюється в 30 Ом. Найбільший рівень ізоляції відносно землі для ліній 6...10 кВ не перевищує 1500 кВ. Звідси одержуємо струм у 50 кА, що не викликає нових перекриттів.

За розрахункову довжину хвилі треба приймати найбільш ймовірні величини 30 – 40 мкс. Довші хвилі обтяжують розрахункові умови.

Розглянемо допоміжну схему рис. 5.3.1,а. Підхід захищений окремими стержневими блискавковідводами. На початку підходу встановлений комплект трубчастих розрядників РТ₁, а на шинах – комплект вентиляльних розрядників РВМ. При ударі блискавки поблизу підходу трубчастий розрядник спрацьовує з дуже малим передрозрядним часом, і хвиля після нього буде мати досить складну форму: короткочасний пік і потім підйом напруги за рахунок опору заземлення і індуктивності спуску. Короткий зрізаний пік на амплітуду струму через вентиляльний розрядник не впливає. Для простоти напругу за трубчастим розрядником можна прийняти рівною:

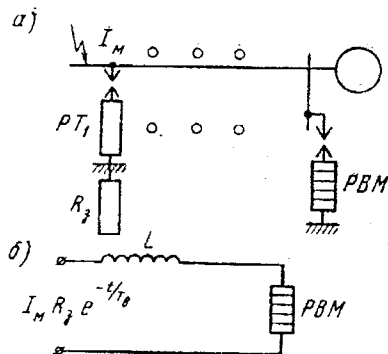


Рис.5.3.1. До розрахунку схеми з повітряним підходом.

$$U = I_M R_3 e^{-\frac{t}{T_B}},$$

де I_M – струм блискавки;

R_3 – опір заземлення;

T_B – постійна часу розрахункового струму, рівна $T_B = \frac{\tau_B}{0,7}$.

Струм через вентиляльний розрядник і залишкову напругу на ньому, що впливає на головну ізоляцію машини, знайдемо із заступної

схеми (рис. 5.3.1,б), у якій захисний підхід замінено зосередженою індуктивністю, причому остання може бути визначена як

$$L = \frac{z l}{c} \text{ мкГн,}$$

де z – хвильовий опір лінії (при проходженні по трьох фазах можна прийняти для ліній 6...10 кВ рівним 280 Ом);

l – довжина підходу, м;

c – швидкість світла, (300 м/мкс).

Складемо рівняння контуру

$$I_M R_3 e^{-\frac{t}{T_B}} = L \frac{di}{dt} + U_p, \quad (5.3.1)$$

де U_p – напруга на розряднику при протіканні імпульсного струму.

В момент максимуму струму $\frac{di}{dt} = 0$, і, отже, рівняння 5.3.1 спрощується

$$I_M R_3 e^{-\frac{t_m}{T_B}} = U_p. \quad (5.3.2)$$

З цього рівняння знаходимо момент часу, що відповідає максимуму струму.

$$t_{\max} = T_B \ln \frac{I_M R_3}{U_p}. \quad (5.3.3)$$

Тепер помножимо вихідне диференціальне рівняння 5.3.1 на dt і проінтегруємо від 0 до t_{\max} . Перший інтеграл дорівнює

$$I_M R_3 \left(1 - e^{-\frac{t_m}{T_B}} \right) T_B,$$

другий

$$\int_0^{t_m} L \frac{di}{dt} dt = \int_0^{I_p} L di = LI_p,$$

де I_p – амплітуда струму через вентиляльний розрядник відповідно часу t_m .

При визначенні третього інтеграла припустимо, що залишкова напруга в інтервалі струмів, близьких до нормованого, залишається

постійною, що справедливо для сучасних розрядників з пологою вольт-амперною характеристикою робочого опору

$$\int_0^{t_m} U_p dt = U_p t_m.$$

Після інтегрування рівняння зводиться до вигляду

$$I_M R_3 T_B \left(1 - e^{-\frac{t_m}{T_B}} \right) = L T_p + U_p t_m.$$

Підставимо в останню формулу значення t_m і одержимо остаточну формулу для визначення струму через вентильний розрядник

$$I_p = \frac{T_B}{L} \left[I_M R_3 - U_p \left(1 + \ln \frac{I_M R_3}{U_p} \right) \right], \quad (5.3.4)$$

який можна використовувати для визначення довжини захищеного підходу.

Приклад 5.1. Розрахуємо довжину захищеного підходу до підстанції 10 кВ з приєднаними обертовими машинами. Опір заземлення трубчастого розрядника РТ₁ дорівнює 3 Ом. При струмі 1500 А залишкова напруга на вентильному розряднику РВВМ дорівнює 32 кВ. Розрахунковий струм блискавки приймемо рівним 50 і 20 кА. Довжина хвилі струму 40 мкс або

$T_B = \frac{40}{0,7} = 57$ мкс. За формулою (5.3.4) індуктивність захищеного підходу

$$L = \frac{57}{1,5} \left[50 \cdot 3 - 32 \left(1 + \ln \frac{150}{32} \right) \right] = 2700 \text{ мкГн},$$

або його довжина 3000 м.

Для струму 20 кА аналогічний розрахунок дає довжину підходу 336 м. Перший результат взагалі не можна використати для реальної схеми захисту. Він тільки показує, що в схемі захисту при дуже великих струмах блискавки не можна обійтися тільки одним зрізом хвилі.

Для схем із повітряним підходом, захищеним від прямих ударів тросом, дати просту розрахункову формулу важко, тому що треба розв'язувати рівняння з магнітоз'язаними індуктивностями троса і проводу. Ще складніший аналіз, якщо врахувати ємність на шинах підстанції. Ось чому використовують моделювання схеми і за результатами вимірювань на моделі будують графіки відповідних залежностей. Крутизну хвилі з врахуванням приєднаної до шин ємності можна визначити графоаналітичним способом або вимірюваннями на моделі.

Довжина повітряного підходу може бути значно знижена, якщо лінія приєднується до шин через реактор.

5.4. Роль кабельних вставок у схемах грозозахисту машин

Повітряні лінії можуть приєднуватись до шин підстанцій через кабельні вставки. Кабельну вставку можна розглядати як один з елементів схеми грозозахисту. Захисна роль вставки полягає в тому, що при спрацюванні трубчастого розрядника на початку кабельного підходу відбувається електричне з'єднання жили кабелю з оболонкою, і імпульсний струм хвилі практично цілком видавлюється на оболонку.

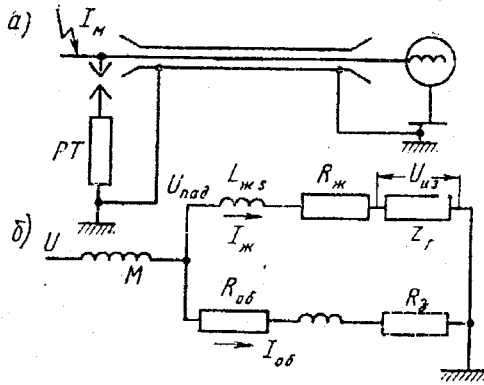


Рис.5.4.1. До розрахунку схем з кабельною вставкою

Розглянемо схему рис. 5.4.1,а. Після пробію іскрових проміжків РТ до жил і оболонки кабелю прикладається напруга U . Рівняння для жили

$$U = L_{жс} \frac{di_{жс}}{dt} + (R_{жс} + z_{г'}) i_{жс} + M \frac{di_{обс}}{dt}$$

для оболонки

$$U = L_{обс} \frac{di_{обс}}{dt} + R_{обс} i_{обс} + M \frac{di_{жс}}{dt}$$

або, представляючи індуктивність жили $L_{жс} = M + L_{жс}$, а індуктивність оболонки тільки M (тому, що через повне охоплення жил оболонкою, розсіювання оболонки відсутнє), отримуємо

$$U = M \frac{d(i_{жс} + i_{обс})}{dt} + L_{жс} \frac{di_{жс}}{dt} + (R_{жс} + z_{г'}) i_{жс}$$

$$U = M \frac{d(i_{\text{зс}} + i_{\text{об}})}{dt} + R_{\text{об}} i_{\text{об}}, \quad (5.4.1)$$

З 5.4.1 можна побудувати відповідну заступну схему (рис.5.4.1,б). З неї випливає, що, якщо не врахувати опори заземлення підстанції і індуктивність з'єднувального проводу між оболонкою і контуром заземлення, то напруга на обмотці генератора буде складатись тільки з падіння напруги в активному опорі оболонки кабелю. Зниження напруги уздовж оболонки цілком передається магнітною індукцією жилі, і до обмотки прикладається незначна напруга. Жили кабелю з'єднуються з оболонкою тільки після пробую іскрових проміжків РТ. При цьому в кабель проникає лише пік напруги, рівний за амплітудою пробивній напрузі РТ і за тривалістю – передрозрядному часу. Незважаючи на те, що амплітуда його може бути дуже великою, небезпеки він не створює, тому що згасає при проходженні декількох десятків метрів у кабелі.

До недоліків схеми із кабельними вставками треба віднести і те, що спрацювання трубчастого розрядника на початку вставки ускладнене. Причина цього полягає в малому хвильовому опорі кабелю і, отже, малому коефіцієнті заломлення для хвилі, що набігає з повітряної лінії. Крім того, якщо подвійний час пробігу хвилі по кабелю менший передрозрядного часу, то відбита від ємності шин хвиля знижує напругу на РТ.

Надійно трубчастий розрядник спрацьовує тільки при ударах блискавки із струмом

$$I_{\text{max}} \geq \frac{U_{\text{РТ}}}{z_{\kappa}}, \quad (5.4.2)$$

де $U_{\text{РТ}}$ – пробивна напруга на РТ при часі, приблизно рівному 2мкс ;
 z_{κ} – хвильовий опір кабелю.

Для того, щоб через вентиляльний розрядник на шинах не проходив струм, що перевищує нормований, необхідно дотримуватись такої нерівності (на підставі рівняння 4.3.1):

$$I_{\text{max}} \leq \frac{U_{\text{PB}} + z_{\kappa} I_{\text{P}}}{2z_{\kappa}} = I'. \quad (5.4.3)$$

Якщо струм блискавки $I_{\text{max}} > I'$, то інтервал струмів від I_{max} до I' , небезпечний для ізоляції машин.

Оскільки для схем із кабельною вставкою, на відміну від схем із повітряним підходом, найбільш небезпечними є удари блискавки з малими струмами, то за розрахунковий потрібно приймати випадок

набігання хвилі по одній фазі (при малих струмах малоймовірні міжфазні перекриття і, отже, поява хвиль одночасно на трьох фазах).

Приклад 5.2. Оцінімо надійність грозозахисту генератора 3 кВ вентиляним розрядником РВВМ-3 у схемі з кабельною вставкою (кабель 3кВ з перерізом жили 95 мм²) і трубчастим розрядником РТФ-3. Хвильовий опір такого кабелю при русі хвилі по трьох фазах складає 5 Ом, по одній фазі – 10 Ом. Залишкова напруга на розряднику РВВМ при струмі 3 кА дорівнює 11 кВ.

При $t = 2$ мкс пробивна напруга трубчастого розрядника дорівнює 50 кВ, а струми $I_{\max} = \frac{50}{10} = 5$ кА; $I' = \frac{11 + 10 \cdot 3}{2 \cdot 10} = 2,05$ кА. Інтервал небезпечних струмів 5...2,05 кА.

При перерізі жили кабелю 300 мм² опір $z_k = 6,6$ Ом, а струми $I_{\max} = \frac{50}{6,6} = 7,6$ кА; $I' = \frac{11 + 6,6 \cdot 3}{2 \cdot 6,6} = 2,34$ кА.

Інтервал небезпечних струмів $2,34 \text{ кА} < I < 7,6 \text{ кА}$.

Приклад 5.2 дозволяє зробити висновок, що при всіх перерізах кабелю, що зустрічаються практично, найпростіша схема із вставкою не може забезпечити повного грозозахисту генераторів і двигунів напругою 3кВ.

Аналогічні розрахунки для машин 6 і 10 кВ показують, що умови захисту набагато кращі, але при деяких перерізах кабелю повного грозозахисту схема також не дає.

Ефективним заходом поліпшення захисних властивостей схеми з кабельною вставкою є вмикання невеличкої індуктивності. Падіння напруги на індуктивності збільшує при даному струмі блискавки напругу на трубчастому розряднику і забезпечує його спрацювання при струмах менших, ніж I_{\max} . Замість індуктивності (розрахунок показує, що вона повинна бути в межах 50-100 мкГн) можна використовувати відрізок лінії ще з одним комплектом трубчастих розрядників.

Замість трубчастих розрядників перед кабельною вставкою, що працюють при малих струмах блискавки нечітко, можна ставити вентиляний розрядник.

Важливо відзначити ще одну обставину. Якщо до шин присьднана через кабельні вставки велика кількість ліній, то можна забезпечити грозозахист машин простими схемами – ємності кабелів поглинають хвилю, що набігає з повітряної лінії.

5.5. Захист обертових машин від індукованих перенапруг

Як видно з табл. 5.1, розрядники РВВМ і навіть РВМ мають залишкові напруги, приблизно того ж порядку, що і заводські випробувальні напруги, а координація ізоляції обертових машин і характеристик розрядників не досконала. Тому часті спрацювання вентиляльних розрядників небажані. Наявність трубчастих розрядників у схемах захисту від прямих ударів не запобігає спрацюванню вентиляльних розрядників від індукованих перенапруг. Число спрацювань може бути досить високим, якщо не вжити заходів для обмеження цих перенапруг.

Як показали розрахунки (див. розділ 2), можливість небезпечних для ізоляції машин індукованих перенапруг велика. Методика розрахунку ґрунтується на тому, що в процесі лідерного розряду потенціал проводу залишається рівним нулю, заряди на проводі розділяються, але під час зворотного (головного) розряду відбувається звільнення зв'язаних зарядів і розтікання їх у вигляді хвиль вздовж лінії. Індукована перенапряга визначалась шляхом складання елементарних хвиль. На коротких лініях перенапругу можна визначити простіше. Середня тривалість зворотного розряду біля 50-100 мкс. За цей час на лінії довжиною в декілька кілометрів відбудеться велике число відбиттів від кінців, і в розрахунку лінії можна представляти зосередженою ємністю. На одиницю довжини ця ємність дорівнює C_0 .

Вважаючи, що удар блискавки відбувається поблизу середини лінії, можна індукований зворотним розрядом заряд на одиницю довжини оцінити так:

$$dQ_x = E_z(x, t) h C_0 dx. \quad (5.5.1)$$

Електрична складова напруженості і індукований заряд монотонно зростає в процесі розвитку зворотного розряду і досягає найбільшого значення в його кінці.

Напруженість поля каналу блискавки визначаємо за формулою (1.3.9).

Якщо висота хмари $vt = H$ досягає декількох кілометрів, то першим членом в формулі (1.3.9) можна знехтувати. Максимальне значення сумарного заряду на лінії визначаємо інтегруванням виразу (5.5.1):

$$Q = 2 \int_0^{\frac{l}{2}} \frac{60}{\beta} I_M h \frac{C_0 dx}{\sqrt{x^2 + b^2}} = \frac{120 C_0 I_M h}{\beta} \ln \frac{\frac{l}{2} + \sqrt{\frac{l^2}{4} + b^2}}{b}; \quad (5.5.1')$$

$$U_0 = \frac{Q}{C_0 l} = 120 \frac{I_M h}{\beta l} \ln \frac{l + \sqrt{\frac{l^2}{4} + b^2}}{b}. \quad (5.5.2)$$

Максимальне значення індукованої напруги

$$U_{\max} = U_0 \frac{C}{C + C_{ш}}, \quad (5.5.3)$$

де $C_{ш}$ – ємність шин, до яких приходить дана лінія (ємність шин, обмоток генератора, інших кабельних і повітряних ліній). Напруга, що індукується, U_0 , яка була б при ідеально ізольованій лінії, залежить від струму блискавки, швидкості розвитку головного розряду і відстані місця удару від лінії. При цьому нас цікавлять не стільки максимально можливі значення перенапруг, скільки ймовірність виникнення перенапруг заданої амплітуди. Визначити цю ймовірність можна так, як це робилося в розділі 2, де було показано, що кількість перенапруг амплітудою 200 кВ складає біля 10 разів в рік, перенапруг 300 кВ – приблизно 5 разів в рік на лінії в 100 км в районі середньої інтенсивності грозової діяльності (20 днів).

У подальших розрахунках найбільшу амплітуду індукованих перенапруг приймаємо рівною 300 кВ.

Приєднана до шин ємність, як очевидно з формули (5.5.3), значно знижує індуковану перенапругу, що приходить на обмотки машин. Вважаючи, що $U_0 = 300$ кВ, визначимо ємність на шинах, необхідну для обмеження перенапруги до допустимої

$$C_{ш} = C \left(\frac{U_0}{U_{дон}} - 1 \right) = C \left(\frac{300}{U_{дон}} - 1 \right). \quad (5.5.4)$$

Якщо приєднана ємність менша отриманої за цим співвідношенням, то необхідно додатково встановити декілька конденсаторів типу КМ, призначених для поліпшення коефіцієнта потужності.

При оцінці C і приєднаної ємності $C_{ш}$ треба мати на увазі, що якщо від шин відходить декілька ліній в одному напрямку, то ємність лінії береться як сумарна, тому що в іншому випадку на всіх лініях індукується перенапруга. Якщо ж лінії відходять від станції в різних напрямках, то при наведенні перенапруги на одній з них інші відіграють роль навантаження, і ємність нульової послідовності цих ліній повинна враховуватися в ємності $C_{ш}$.

Приклад 5.3. Від шин відходять в одному напрямку декілька повітряних ліній 6 кВ загальною довжиною 20 км. Яку ємність треба приєднати до шин, щоб індуковані перенапруги не перевищували випробувальної напруги ізоляції обмоток генераторів?

Ємність повітряної лінії на кілометр приблизно дорівнює $5 \cdot 10^{-3}$ мкФ. Лінії проходять далеко одна від одної, тому екранування враховувати не будемо. Ємність усіх ліній складе $20 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 0,1$ мкФ.

Випробувальна напруга машин 6 кВ $U_{\text{вип}} = 1,5\sqrt{2}U_{\text{ном}} = 12,8$ кВ. При найбільш ймовірній величині $U_0 = 300$ кВ знайдемо необхідну ємність на шинах.

$$C_{\text{ш}} = 0,1 \left(\frac{300}{12,8} - 1 \right) = 2,25 \text{ мкФ.}$$

Її мають три конденсатори КМ-6,3-10-1 або один КМ-6,3-25-1.

За формулами (5.5.2) і (5.5.3) можна оцінювати індуковані перенапруги на гнучких зв'язках або шинних мостах, якими генератори станцій часто зв'язані з трансформаторами.

Гнучкі зв'язки на території станції досягають декількох десятків або сотень метрів. Підстанції мають захист від прямих ударів блискавки. Місця ударів у блискавководводи відомі, отже, відомі відстані b . При $I_M = 50$ кА, $\beta = 0,2$, $h = 10$ м і $b = 10$ м оцінимо U_0 для шин довжиною 100м:

$$U_0 = \frac{120 I_M h}{\beta l} \ln \frac{\frac{l}{2} + \sqrt{\frac{l^2}{4} + b^2}}{b} = \frac{120 \cdot 50 \cdot 10}{0,2 \cdot 100} \ln \frac{50 + \sqrt{50^2 + 10^2}}{10} \approx 7000 \text{ кВ.}$$

Такі перенапруги практично ніколи не виникають, тому що навіть невеличка ємність обмотки трансформатора або генератора сильно знижує величину перенапруг.

5.6. Схеми захисту генераторів і двигунів великої і середньої потужності від прямих ударів блискавки у лінію

В схемах грозозахисту обертових машин передбачено ступеневе обмеження хвилі, що набігає на шини, захисними проміжками і трубчастими розрядниками. При ударах на значній відстані від початку захищеного підходу хвиля деформується через втрати на корону. Проте для ліній 6-10 кВ коронна напруга складає приблизно 120-180 кВ, у той час як напруга спрацювання трубчастих розрядників менше цих величин. Отже, можна вважати, що фронт хвилі, що діє на розрядник, буде таким же, як у місці прямого удару. З цього погляду можна не розрізняти ударів, віддалених і близьких, але амплітуда хвилі, що діє на схему після

спрацювання розрядника PT_1 , буде тим меншою, чим далі відбувається прямий удар у лінію. Напруга в місці удару при струмах блискавки, що перевищують рівень грозостійкості лінії, визначається опором самозаземлення блискавки і її струмом.

За розрахунковий випадок звичайно приймають удар поблизу підходу. Крутизна хвилі в місці удару дорівнює:

$$a \approx \frac{zI_M}{2} \approx \frac{zI_0}{4}.$$

При хвильовому опорі лінії 280 Ом (хвилі рухаються по трьох фазах) крутизна напруги $a = 70I_0'$ кВ/мкс. При порівняно великій крутизні струму блискавки спрацювання трубчастих розрядників відбувається протягом декількох десятих мікросекунди. Дуже важливо, щоб пробій трубчастих розрядників схеми відбувався в заданій послідовності.

При дуже малих крутизнах хвилі може бути неселективна робота розрядника PT_2 . Якщо пробивна напруга розрядника PT_1 дорівнює 100 кВ, PT_2 – 60 кВ, то при відстані між розрядниками l крутизна хвилі повинна бути не меншою, ніж

$$a \geq \frac{U_{PT_1} - U_{PT_2}}{2l} v.$$

Наприклад, при $l=100$ м

$$a \geq \frac{100 - 60}{2 \cdot 100} 300 = 60 \text{ кВ/мкс.}$$

При меншій крутизні хвилі може спочатку спрацювати комплект розрядників PT_2 , але такі крутизни відповідають крутизнам струму блискавки, що безпечні для ізоляції машин. Неселективне спрацювання трубчастих розрядників може бути наслідком розкиду їх розрядних характеристик. За наявності захисного стержневого проміжку на лінії перед PT_1 , величиною приблизно 75 см, що відповідає розрядній напрузі в 3-4 рази більшій, ніж у PT_1 , забезпечується селективна робота проміжку і розрядників PT_1 .

На рис. 5.6.1 наведена схема захисту з повітряним підходом. Інтервал між захисними характеристиками розрядників PT_1 і PT_2 складає 40%. Довжина підходу приблизно 250 м, причому підхід від прямих ударів захищається або стержневим, або тросовим

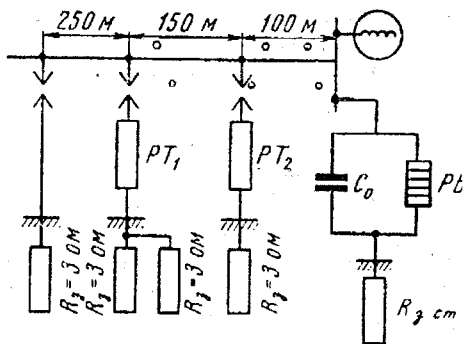


Рис.5.6.1. Схема захисту обертових машин з повітряним підходом без реактора

блискавковідводами. Розрахунок показує, що струм у PT_2 складає тільки 25% струму в PT_1 . Для того, щоб напруга на машині не була більшою випробувальної (тобто більшою 13,8 кВ), через PT_1 можна пропустити струм приблизно 20 кА. Всі більші струми хвилі, що приходять із лінії, відсікаються іскровим проміжком. Небезпечними будуть тільки удари в незахищену частину лінії між іскровим проміжком і PT_1 , але кількість випадків виникнення струму в 20 кА на довжині лінії 250 м складає один раз у 70 років.

При застосуванні розрядників серії РВМ і підвищенні випробувальних напруг до $1,7U_{ном}$ ($1,7\sqrt{2} \cdot 6 = 14,4 \text{ кВ}$) ефективність схеми значно підвищується. Напруга на шинах буде менша 14,4 кВ навіть при струмі через PT_1 до 50 кА. Оскільки схема рис. 5.6.1 дуже надійна, її можна рекомендувати для захисту машин великої і середньої потужності (але не вище 15 МВт). За ПУЕ генератори більші 15 МВт і синхронні компенсатори більші 20 МВт можна приєднувати до повітряних ліній тільки через трансформатори. Схему рис. 5.6.1 (без захисту підходу тросом або стержневими проміжками) можна рекомендувати для захисту двигунів до 3 МВт, що мають надійне резервування. Можливість удару в ділянку довжиною приблизно 200 м, і до того ж у забудованій місцевості, дуже мала (навіть для лінії 35 кВ і вище, що йдуть по відкритій місцевості, за формулою (2.1.1)

одержуємо $1,8 \frac{10 \cdot 0,2}{100} = 0,036$ ударів за рік або раз у 28 років). Якщо лінія з реактором, то взагалі знімаються побоювання щодо нечіткої роботи розрядника PT_2 при прямому ході хвилі. Схеми з повітряним підходом і реактором при розрядниках РВ дуже надійні, тому схеми з

реакторами можна рекомендувати навіть для захисту машин великої потужності, тобто в 25 – 30 МВт (рис. 5.6.2).

Для захисту машин середньої потужності можна застосовувати схему з кабельною вставкою (рис. 5.6.3). Без захисту підходу тросом цю схему можна використовувати для машин до 5 МВт.

Надійні схеми з кабельною вставкою і реактором (показник надійності більше 100 років) можна рекомендувати для захисту відповідальних машин потужністю 25 – 30 МВт (рис. 5.6.4). В схемах із реакторами треба встановлювати перед реактором вентильний розрядник, тому що необхідно зважати на небезпечні перенапруги на лінійній стороні реактора. Для захисту реактора ставлять вентильний розрядник серії РВП.

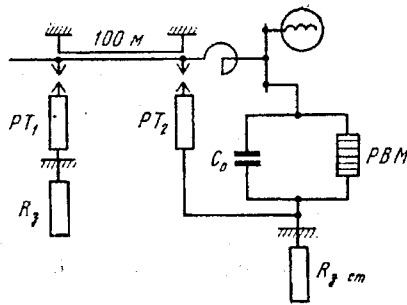


Рис. 5.6.2. Схема захисту з повітряним підходом і реактором

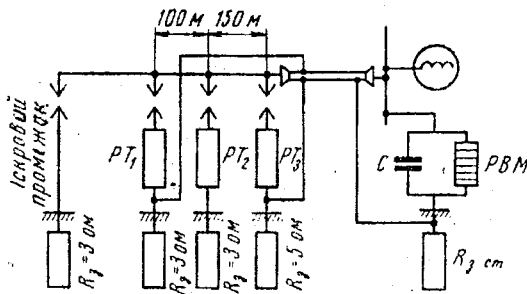


Рис. 5.6.3. Схема з кабельною вставкою без реактора

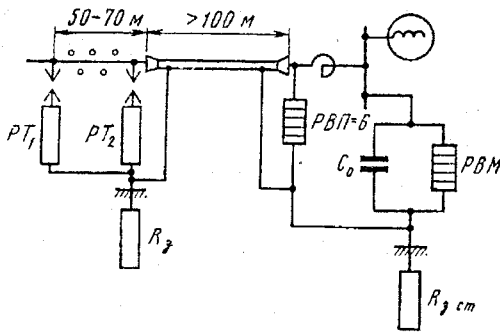


Рис. 5.6.4. Схема з короткою кабельною вставкою і реактором

В усіх схемах грозозахисту машин обов'язкова установка конденсаторів, які знижують крутизну хвилі, що набігає на обмотки, і обмежують індуковані перенапруги при ударах поблизу лінії. У схемах із розрядником типу РВМ встановлюють ємності 0,6 мкФ на фазу. Ставити спеціальні захисні ємності не потрібно, якщо є ємність інших ліній і кабелів, приєднаних до шин підстанції. Нейтраль електричної машини заземлюється при необхідності або через вентиляльний розрядник, або через опір величиною в 2 – 2,5 рази більший хвильового опору обмотки (на схемах не показаний).

Захист генераторів малої потужності і високовольних двигунів здійснюється за простішими схемами. Спрощення стосується підходу, який не захищається від прямих ударів блискавки. В іншому схема зберігається тією ж. Щоб скоротити відстань до комплексу трубчастих розрядників PT_1 , нерідко підвішується повітряна противага. Противага – це провід, що підвішується над або під фазними проводами і заземлюється (рис. 5.6.5,а). Від прямих ударів він, звичайно, захищати проводи не може, але дозволяє поліпшити захисні властивості схеми, відіграючи таку ж роль, як оболонка в схемі з кабельною вставкою (рис.5.6.5,б). Після пробією PT_1 струм хвилі перенапруги тече і по проводу, і по противазі, причому струм в противазі індукуює е.р.с., що перешкоджає протіканню струму в проводі, тобто противага ніби збільшує індуктивність проводу, і відстань до PT_1 скорочується.

Схема з противагою застосовується в різних модифікаціях, але в чистому вигляді – у тих випадках, коли споживачі є відповідальними, а обладнувати підхід тросом або окремо стоячими блискавковідводами буває важко, – наприклад, потужні двигуни на будівництвах або

торфорозробках, — і в той же час завдяки відкритому характеру місцевості живильні лінії часто підлягають під прямі удари блискавки.

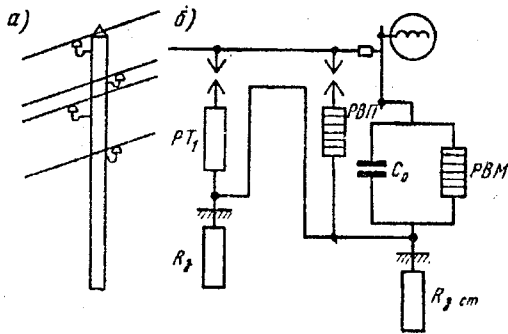


Рис. 5.6.5. Схема захисту з противагою

Закінчуючи огляд схем захисту обертових машин від перенапруг, слід зазначити, що в усіх розглянутих схемах залишається небезпека uszkodження поздовжньої ізоляції (міжвиткової), незважаючи на встановлення емностей, що розтягують фронт набігаючої хвилі. Причиною uszkodження обмоток є можливість перекриття забрудненого або дефектного ізолятора, апарата або елемента шин, яке призводить до зрізів хвиль з високою швидкістю. Це створює на поздовжній ізоляції обмоток великі градієнтні перенапруги. Для запобігання аварій дуже важливо своєчасно проводити профілактичні заходи по відновленню рівня зовнішньої ізоляції (сушіння, очищення, ремонт і т.п.) і регулярно її випробувати, для своєчасного виявлення дефектних елементів і їх заміни.

Обмотки машин також треба регулярно випробувувати згідно з нормами. Тільки за цих умов можна говорити про надійність схем грозозахисту.

Контрольні запитання

1. Що таке коефіцієнт імпульсу головної ізоляції електричної машини?
2. Якими пристроями можна обмежити крутизну грозового імпульсу?
3. В чому полягає магнітне гасіння дуги в розряднику?

ЛИТЕРАТУРА

1. Базелян Э. М., Горин Б. Н., Левитов В. Н. Физические и инженерные основы молниезащиты. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 223с.
2. Базелян Э. М., Ражанский И. М. Искровой разряд в воздухе. – Новосибирск: Наука, 1988. – 164с.
3. Анализ надежности грозозащиты подстанций / Костенко М. В., Ефимов Б. В., Зархи И. М. и др. – Л.: Наука, 1981. – 128с.
4. Костенко М. В. Техника высоких напряжений. – М.: Высшая школа, 1973. – 528с.
5. Электрофизические основы техники высоких напряжений /Бортник И. М., Верецагин И. П., Вершинин Ю. Н. и др. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 543с.
6. Техника высоких напряжений / Кучинский Г. С., Костенко М. В., Тиходеев Н.Н. и др. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2003. – 608с.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- ВН – висока напруга;
- НЕП – напруженість електричного поля;
- ПУБ – прямий удар блискавки;
- ПЛІЕП – повітряна лінія електропередач;
- ЕП – електричне поле;
- МП – магнітне поле;
- РВМ – вентильний розрядник з магнітним гасінням дуги;
- РТ – трубчастий розрядник.

Навчальне видання

Валерій Степанович Собчук

**ГРОЗОЗАХИСТ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ
КОМПЛЕКСІВ**

Оригінал-макет підготовлено автором

Редактор С.А. Малішевська

Навчально-методичний відділ ВНТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку 16.09.2005 р.

Формат 29,7x42¼

Друк різнографічний

Наклад 75 прим.

Зам. № 2005 - 154

Гарнітура Times New Roman

Папір офсетний

Ум. друк.арк. 6.12

Відруковано в комп'ютерному Інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95