



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА
катедра „Електроенергетика“



РАЗРАБОТЕНИ ТЕМИ ЗА ДЪРЖАВЕН ИЗПИТ
ЗА ОБРАЗОВАТЕЛНО-КВАЛИФИКАЦИОННА СТЕПЕН

„БАКАЛАВЪР“

СПЕЦИАЛНОСТ „ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА“

РАЗДЕЛ I

**„Електротехнически материали, техника на високите напрежения
и техническа безопасност“**

Съставил:

доц. д-р инж. М.Василева

Версия 02.2019 г.

СЪДЪРЖАНИЕ

ТЕМА 7. Електрически процеси в диелектрици	3
7.1. Експериментални характеристики на пробивни процеси в газове	3
7.1.1. Разрядни характеристики в зависимост от формата на напрежението ($U_{пр}=f(d)$)	3
7.1.2. Волт-временни характеристики	5
7.1.3. Крива на импулсен ефект (КИЕ).....	5
7.2. Оразмеряване на изолационна система на РУ и ЕП	6
ТЕМА 8. Вътрешни пренапрежения в ЕЕС. Определение. Класификация. Причини за възникване. Механизъм на развитие. Кратности.	7
8.1. Комутационни пренапрежения	7
8.1.1. Включване на ненатоварен електропровод (ЕП).....	7
8.1.2. Изключване на ненатоварен ЕП	7
8.1.3. Автоматично повторно включване (АПВ)	7
8.1.4. Изключване на ненатоварен трансформатор	7
8.1.5. Непълнофазни режими на електрическата мрежа (скъсване на фазов проводник, неедновременност на включване и изключване на контактната система на прекъсвачи и др.).....	7
8.2. Трайни (установени) пренапрежения	8
8.2.1. Мрежи с изолиран звезден център ($Z_N=\infty$).....	8
8.2.2. Мрежи със заземен през индуктивност звезден център ($Z_N=j\omega L$)	9
8.2.3. Мрежи със заземен през активно съпротивление звезден център ($Z_N=R$)	9
8.2.4. Мрежи с ефективно заземен звезден център ($Z_N=0$)	10
ТЕМА 9. Атмосферни пренапрежения във въздушни електропроводи. Определение. Класификация. Механизъм на развитие. Кратности	12
9.1. Пренапрежения от пряк удар на мълния върху стълб без мълниезащитен проводник (МЗП)	12
9.2. Пренапрежения от пряк удар на мълния върху фазов проводник (ФП) при електропровод без МЗП (Фиг. 9.3).....	13
9.3. Пряк удар на мълния върху електропровод с МЗП.....	13
9.3.1. Пряк удар на мълния върху стълб (Фиг. 9.4)	13
9.3.2. Пряк удар на мълния върху МЗП (Фиг. 9.5).....	14
9.4. Пряк удар на мълния във фазов проводник при наличие на МЗП ("провирание" на мълния) (Фиг. 9.6).....	14
9.5. Индуктирани пренапрежения	14
9.6. Специфичен брой изключвания на ЕП при попадения на мълния.....	15

ТЕМА 10. Апарати за защита от пренапрежения. Видове. Защитни характеристики. Избор	17
10.1. Видове защитни апарати	18
10.1.1. Искрови отводи (Фиг. 10.2)	18
10.1.2. Тръбни отводи (ТО) (Фиг. 10.3)	18
10.1.3. Вентилни отводи с искрова междина (ВО ИМ).....	19
10.1.4. Металоксидни вентилни отводи (МОВО).....	19
10.2. Избор на ВО.....	20
10.2.1. Избор на ВО ИМ.....	20
10.2.2. Избор на МОВО.....	20
ТЕМА 11. Координация на изолацията	21
ДОПЪЛНИТЕЛНА ЛИТЕРАТУРА.....	25

ТЕМА 7. Електрически процеси в диелектрици

Пробив в електрическа изолация е загуба на електроизолационните свойства в резултат на формиране на област между два електрода на изолационна система със спонтанно нарастваща електропроводимост. Когато областта свързва двата електрода пробива се нарича пълен, а когато обхваща само част от междуелектродното пространство - непълен ("корона", частични разряди). Числена характеристика на пробива е *електрическата якост* на изолацията. Определя се като минимално напрежение, над което възниква пробив ($U_{пр}$). Производна величина от $U_{пр}$ е пробивния интензитет на електрическото поле - $E_{пр}=U_{пр}/d$, където d е най-малкото разстояние между електродите, независимо от дължината на пробивния канал. *Краткотрайна електрическа якост (КЕЯ)* - характеризира гранична способност на изолацията да издържа на напрежения с продължителност на въздействие, много по-малка от времето на развитие на значими за пробив топлинни явления. *Дълготрайна електрическа якост (ДЕЯ)* - характеризира способността на изолацията да издържа най-голямото работно напрежение за продължителен период от време. Числено се определя като КЕЯ на изолацията в края на зададен период. Статистически получените стойности се обобщават в зависимост наречена "крива на живот". Тя се използва за определяне на работното напрежение и нормиране на изпитвателни напрежения при координация на изолацията.

Пробивните процеси в електрическата изолация зависят главно от интензитета на електрическото поле. За числени характеристики на натовар-ването на изолацията се използват *коэффициент на неравномерност на електрическото поле* ($k_n=E_{max}/E_{cp}$) и *коэффициент на използване на изолацията* ($k_u=1/k_n$), където $E_{cp}=E_{пр}$ - среден интензитет на електрическото поле, при който настъпва пробив. В зависимост от стойността на k_n електрическите полета се класифицират като равномерни ($k_n=1$), слабо неравномерни ($k_n<2$), неравномерни ($2<k_n<4$) и силно неравномерни ($k_n>4$).

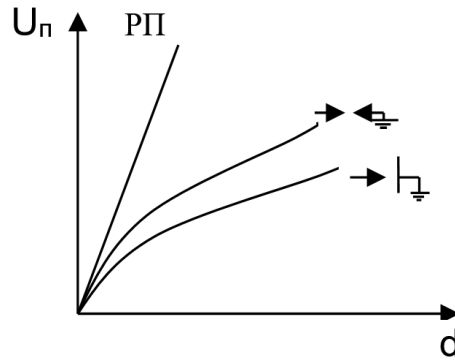
Развитието на пробив в газове започва от начален свободен електрон, който създава електронна лавина. Възможността за поява на нови свободни електрони определя характера на пробива - самостоятелен или несамостоятелен. *Условието за самостоятелност на пробива* е $\gamma(e^{\alpha d}-1)=1$, γ - коэффициент на вторична йонизация, α - коэффициент на обемна ударна йонизация.

7.1. Експериментални характеристики на пробивни процеси в газове

7.1.1. Разрядни характеристики в зависимост от формата на напрежението ($U_{пр}=f(d)$)

а) Разрядни характеристики при напрежение с промишлена честота (с Фиг. 7.1) - използват се за оразмеряване на изолационни системи (ИС) при работни напрежения.

Особености - за равномерно поле характеристиката е права линия, а за неравномерно - с изразена нелинейност за разстояния над 1 m. Всички реални изолационни системи в газова изолация могат да се приравнят условно до системи острие - плоскост или острие - острие.

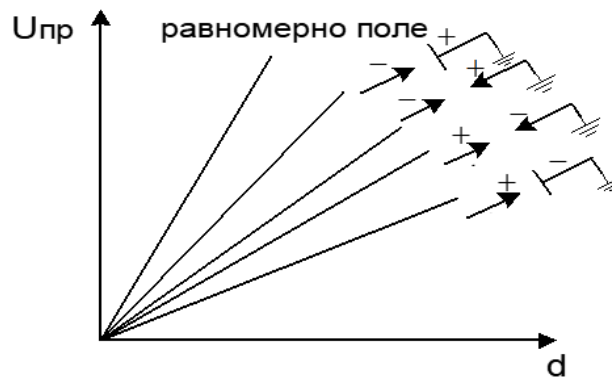


Фиг. 7.1. Разрядни характеристики при напрежение с честота 50 Hz

б) Разрядни характеристики при изправено напрежение (Фиг. 7.2)

Разположението на характеристиките се обяснява с ефекта на полярност.

Особености: разрядните характеристики са линейни, разсейването на пробив-ните напрежения е в граници (3-5) %, разрядната характеристика за променливо напрежение се различава незначително от разрядната характеристика за същата електродна система при положителна полярност.



Фиг. 7.2. Разрядни характеристики при изправено напрежение

в) Разрядни характеристики при импулсно напрежение

Моментът на възникване на пробив при импулсно напрежение е вероятностно-статистическа величина. Времето за настъпване на пробив ($t_{пр}$) има три съста-вящи: t_0 - момент от време, в който е изпълнено условието за самостоятелност на пробива, t_e - време за поява на начален електрон и t_ϕ - време за формиране на лавини и стримери ($t_{пр}=t_0+t_e+t_\phi$). Ако времето, за което напрежението достига началното напрежение U_0 , е по-малко от $t_{пр}$, пробив не може да настъпи.

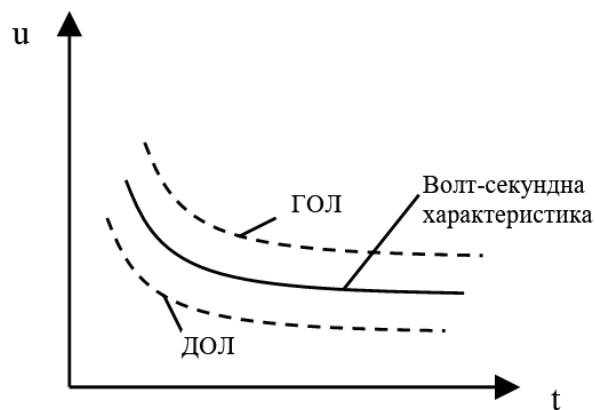
За да има еднаквост в понятията се въвежда величината "петдесет процентно пробивно напрежение" - $U_{пр50\%}$. Това е върхова стойност на стандартен мълниев импулс, който подаден определен брой пъти върху електродната система в 50 % от случаите предизвиква пробив. Разрядните характеристики имат форма, съвпадаща с разрядните характеристики от Фиг. 7.2. Особености: разрядните характеристики при импулсно напрежение са разположени над разрядните характеристики за изправено напрежение, като разликата в пробивните напрежения е $1,5\div 2$ пъти. Разрядните характеристики не

дават представа за развитието на процеса във времето. За импулсни въздействия е необходимо да се познава и волт-секундната характеристика на ИС.

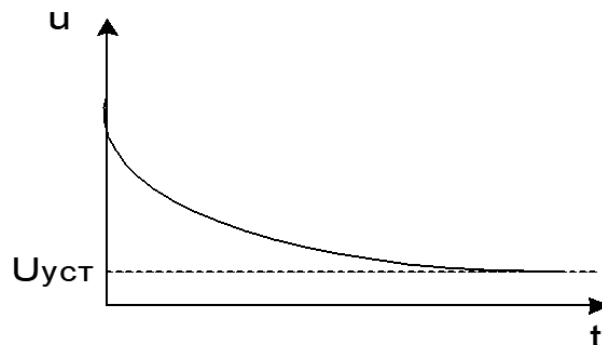
7.1.2. Волт-временни характеристики

Зависимостта на максималното пробивно напрежение от времето за пробив се нарича волт-секундна характеристика ($U_{пр}=f(t_{пр})$). Тя се използва за оразмеряване на изолационни системи и за избор на защитни апарати при въздействие на импулси-апериодични и колебателнозатихващи напрежения. За по-голяма прецизност се използва волт-секундната област - между долна огра-ничителна линия (ДОЛ) и горна ограничителна линия (ГОЛ) (Фиг. 7.3). Въвеждането им има практическа идея при осъществяване на координация на изолацията на съоръжения с различна степен на важност.

Зависимостта на електрическата якост на изолацията от времето на прилагане на напрежение се нарича обобщена волт-временна зависимост или "крива на живот" (Фиг. 7.4) и е от вида $\tau E^n = const$ (E - електрическа якост на изолацията в момент от време τ , n - показател на стареене). Тази зависимост се определя за конкретна изолационна конструкция или опитен образец, а не за изолационен материал.



Фиг. 7.3. Волт-секундна характеристика на изолационна система



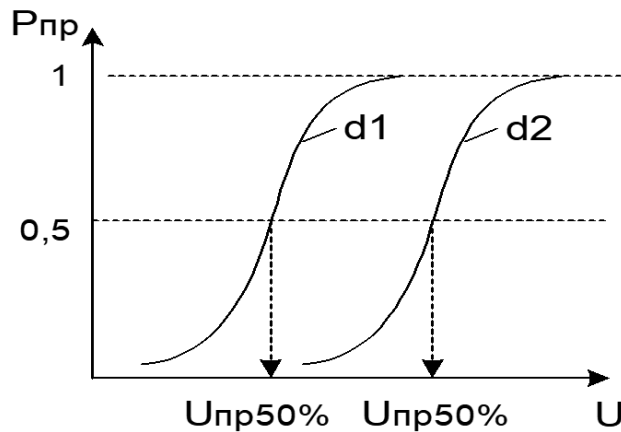
Фиг. 7.4. Крива на живот на изолационна система

7.1.3. Крива на импулсен ефект (КИЕ)

За да се построи разрядната характеристика при импулсно напрежение е необходимо да се знае $U_{пр50\%}$. Най-точно то се получава от кривата на импулсен ефект (Фиг.

7.5), която характеризира вероятността импулсното пробивно напрежение да бъде по-малко или равно на определена стойност за дадено разстояние между електродите ($P_{пр}=f(U_{пр})$).

От КИЕ могат да се отчитат $U_{пр0}$ и $U_{пр100}$. Губи се обаче информация за времето на пробив.



Фиг. 7.5. Криви на импулсен ефект

7.2. Оразмеряване на изолационна система на РУ и ЕП

При определяне на изолационните разстояния между тоководещите части, а също и между тоководещи части и заземени елементи на РУ, е необходимо да се вземат под внимание изпитвателните напрежения за съответното оборудване. За РУ с напрежение до 220 kV определящи са импулсните изпитвателни напрежения, а за РУ 330 и 500 kV - изпитвателните напрежения с промишлена честота. Определяне на необходимото изолационно разстояние се прави по експериментални разрядни характеристики или по аналитични изрази. Изолационните разстояния между фазите се приемат с 10 % по-големи от тези между фаза и земя.

Изолаторите на откритите ЕП и РУ се оразмеряват и избират с оглед на механичните и електрически натоварвания. От техническите условия, определящи са механичното натоварване и степента на замърсяване на района. Броят на елементите в изолаторните вериги зависи от електрическото натоварване, при това в чисти райони определящи са комутационните пренапрежения, докато в райони с по-голямо замърсяване ролята на работното напрежение е определяща. Така подобрите изолаторни вериги имат необходимото импулсно изолационно ниво, дефинирано чрез издържаните импулсни напрежения. Броят на изолаторите във веригата е даден в таблица 1.

Таблица 7.1

Вид на изолаторите	Брой на елементите				
	20 kV	110 kV	220 kV	400 kV	750 kV
Стъклени	-	7	12	20	2x44
Порцеланови	2	7	12	-	-

ТЕМА 8. Вътрешни пренапрежения в ЕЕС. Определение.

Класификация. Причини за възникване. Механизъм на развитие.
Кратности.

Вътрешните пренапрежения са свързани с промяна на състоянието на системата или някоя нейна част (при превключвания, земни съединения и др.). Подразделят се на комутационни и трайни (установени) пренапрежения. Големината на пренапреженията обикновено се дава в кратност k_n (р.и.) спрямо максималното фазно работно напрежение - $1 \text{ р.и.} = \sqrt{2} \cdot U_m / \sqrt{3}$.

8.1. Комутационни пренапрежения

Комутационните пренапрежения (към земя или между фазите) се дължат на превключвания-режимни и аварийни. Представяват затихващи колебания с продължителност $(1 \text{ до } 50) \cdot 10^{-3} \text{ s}$ и честота от 1 до 200 kHz. Някои от случаите на възникване на комутационни пренапрежения са:

8.1.1. Включване на ненатоварен електропровод (ЕП)

Възникват при системи за свръхвисоко напрежение. Пораждат се, когато дълги ненатоварени ЕП бъдат включвани под напрежение. Преходният процес е нехармонично колебание със затихващ характер. Ако ЕП не е компенсиран, кратността на пренапреженията може да достигне $2,7 \div 2,8$. При компенсиране на ЕП $k_n = 2,2 \div 2,3$.

8.1.2. Изключване на ненатоварен ЕП

Пренапреженията се дължат на повторно запалване на дъгата от капацитивен ток между контактите на прекъсвача. Ако дъгата изгасне при преминаване през нулата на тока с основна честота, $k_n \approx 3$. Ако дъгата изгасне в момента на преминаване през нула на колебателния ток на преходния процес - $k_n = 4 \div 5$.

8.1.3. Автоматично повторно включване (АПВ)

При успешно АПВ $k_n \approx 2,5$, а при неуспешно - $k_n \approx 3,5$.

8.1.4. Изключване на ненатоварен трансформатор

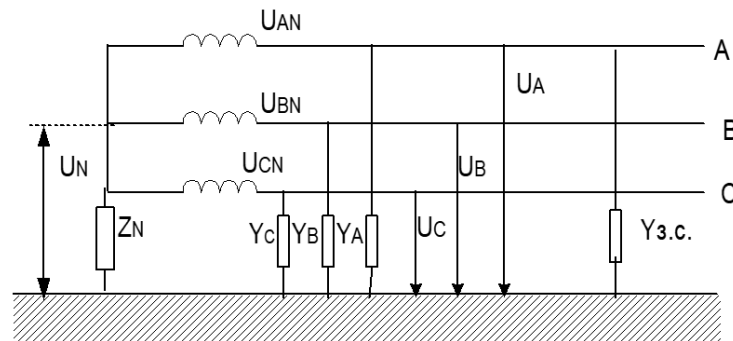
Изключването на индуктивни товари води до появата на пренапрежения, свързани със "срязване" на индуктивния ток преди преминаването му през нулата. k_n в този случай може да достигне $4 \div 5$.

8.1.5. Непълнофазни режими на електрическата мрежа (скъсване на фазов проводник, неедновременност на включване и изключване на контактната система на прекъсвачи и др.)

8.2. Трайни (установени) пренапрежения

Установените пренапрежения в трифазни електрически мрежи са следствие от аварийен режим (земно съединение, късо съединение) и имат честота на колебание, равна на честотата на източника на енергия в мрежата. Продължителността им е от 0,1 секунди до няколко часа. Кратността на установените пренапрежения зависи от режима на звездния център на източника.

В зависимост от режима на звездния център електрическите мрежи се делят на мрежи с: изолиран звезден център; със заземен през индуктивно съпротивление звезден център; със заземен през активно съпротивление звезден център; с ефективно заземен звезден център.



Фиг. 8.1. Схема на трифазна мрежа с изолиран звезден център при еднофазно земно съединение

8.2.1. Мрежи с изолиран звезден център ($Z_N = \infty$)

а) При нормален режим на работа

$$\dot{U}_N = - \frac{\dot{Y}_A \dot{U}_{AN} + \dot{Y}_B \dot{U}_{BN} + \dot{Y}_C \dot{U}_{CN}}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C}$$

- за симетричен режим

$$\dot{Y}_A = \dot{Y}_B = \dot{Y}_C; \dot{U}_N = 0; \dot{U}_A = \dot{U}_{AN}; \dot{U}_B = \dot{U}_{BN}; \dot{U}_C = \dot{U}_{CN}$$

- за несиметричен режим

$\dot{Y}_A \neq \dot{Y}_B \neq \dot{Y}_C; \dot{U}_N = 0$ - за кабелни мрежи; $\dot{U}_N = 0 < 3.5\%$ - за въздушни мрежи

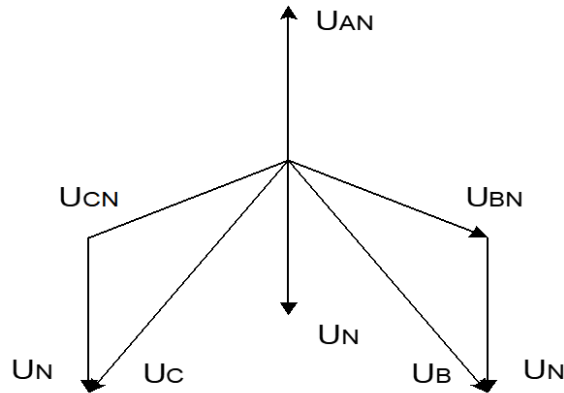
$$\dot{U}_A = \dot{U}_{AN} + \dot{U}_N; \dot{U}_B = \dot{U}_{BN} + \dot{U}_N; \dot{U}_C = \dot{U}_{CN} + \dot{U}_N$$

б) При аварийен режим (метално земно съединение на фаза А)

$$\dot{U}_N = -\dot{U}_\phi; \dot{U}_A = 0; \dot{U}_B = \dot{U}_{BN} = \dot{U}_\phi; \dot{U}_C = \dot{U}_{CN} = \dot{U}_\phi$$

Кратността на установените пренапрежения в този случай е равна на 1,73. Векторна диаграма на напреженията е показана на Фиг. 8.2.

В преходния процес на з.с. фазното напрежение може да достигне 3,2 о.е.



Фиг. 8.2. Векторна диаграма на напреженията в мрежа с изолиран звезден център при еднофазно метално земно

8.2.2. Мрежи със заземен през индуктивност звезден център ($Z_N=j\omega L$)

С цел намаляване на тока на земно съединение и за създаване на условия за самоизгасване на дъгата в звездния център на мрежата се включва дъгогасителна бобина със самоиндуктивност L .

а) При нормален режим на работа

$$\dot{U}_N = -\frac{Y_A \dot{U}_{AN} + Y_B \dot{U}_{BN} + Y_C \dot{U}_{CN}}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_L}$$

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{AN} + \dot{U}_N; \dot{U}_B = \dot{U}_{BN} + \dot{U}_N; \dot{U}_C = \dot{U}_{CN} + \dot{U}_N$$

б) При аварийен режим

$$\dot{U}_N = -\dot{U}_\phi; \dot{U}_A = 0; \dot{U}_B = \dot{U}_{BN} = \dot{U}_L; \dot{U}_C = \dot{U}_{CN} = \dot{U}_L$$

При надкомпенсация ($I_L > I_C$) $I_{з.с.}$ има индуктивен характер, а при подкомпенсация ($I_L < I_C$) - капацитивен характер. В преходния процес на з.с. фазното напрежение може да достигне 2,8 р.и.

8.2.3. Мрежи със заземен през активно съпротивление звезден център ($Z_N=R$)

Компенсирането на $I_{з.с.}$ в кабелни мрежи с дъгогасителни реактори не е целесъобразно. При по-продължителни з.с. се генерират пренапрежения, които могат да предизвикат пробиви и на други места. Тези многоместни пробиви са типични за експлоатацията на кабелни мрежи с отслабена изолация. Ето защо такива мрежи при з.с. трябва да бъдат изключвани без забавяне. Звездните центрове на кабелните мрежи се заземяват през малки активни съпротивления. Всички изводи се окомплектоват с релейни защиты за токове с нулева последователност, които работят на изключване, така че з.с. биват прекъсвани преди още да са прераснали в къси.

а) При нормален режим на работа

$$\dot{U}_N = -\frac{Y_A \dot{U}_{AN} + Y_B \dot{U}_{BN} + Y_C \dot{U}_{CN}}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_R}$$

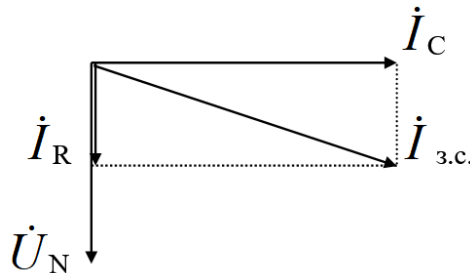
$$\dot{U}_A = \dot{U}_{AN} + \dot{U}_N; \dot{U}_B = \dot{U}_{BN} + \dot{U}_N; \dot{U}_C = \dot{U}_{CN} + \dot{U}_N$$

б) При аварийен режим на работа

$$\dot{U}_N = -\dot{U}_\phi; \dot{U}_A = 0; \dot{U}_B = \dot{U}_{BN} = \dot{U}_\phi; \dot{U}_C = \dot{U}_{CN} = \dot{U}_\phi$$

Токът $I_{3.c.}$ има активна и капацитивна съставлящи ($i_{3.c.} = i_r + i_c$), равни съответно на: $i_r = \dot{U}_\phi / R$; $i_c = 3j\omega C \dot{U}_\phi$.

Векторна диаграма на токовете е показана на Фиг. 8.3. В преходния процес на з.с. фазното напрежение може да достигне 2,4 р.и.



Фиг. 8.3

8.2.4. Мрежи с ефективно заземен звезден център ($Z_N=0$)

В тези мрежи з.с. са фактически еднофазни къси съединения. Токът през мястото на з.с. е съизмерим с големината на тока на трифазно късо съединение. Напреженията на звездния център, на здравите фази и тока $I_{3.c.}$ зависят от параметъра m . Той се дефинира като отношение между импедансите с нулева и с права последователност на системата, отнесени към мястото на з.с.

$$m = \frac{X_0}{X_1} - j \frac{R_0}{X_1}$$

Напреженията на здравите фази се изразяват и с коефициента на заземяване

$$k_3 = \frac{U_\phi^{3c}}{U_\phi}$$

За да бъде мрежата с ефективно заземен звезден център е необходимо

$$\frac{R_0}{X_1} \leq 1 \text{ и } \frac{X_0}{X_1} \leq 3.$$

а) При нормален режим на работа

$$\dot{U}_N = -\dot{U}_\phi; \dot{U}_A = \dot{U}_{AN}; \dot{U}_B = \dot{U}_{BN}; \dot{U}_C = \dot{U}_{CN}$$

б) При аварийен режим на работа

$$\left\{ \begin{array}{l} |i_A| = I_{к.с.}^{(1)} = I_{к.с.}^{(3)} \cdot \frac{3}{|m+2|}; \\ |\dot{U}_B| = |\dot{U}_C| = k_3 \cdot U_\phi, \end{array} \right. \quad I_{к.с.}^{(3)} = \frac{U_\phi}{|\dot{Z}_1|};$$

ТЕМА 9. Атмосферни пренапрежения във въздушни електропроводи. Определение. Класификация. Механизъм на развитие. Кратности

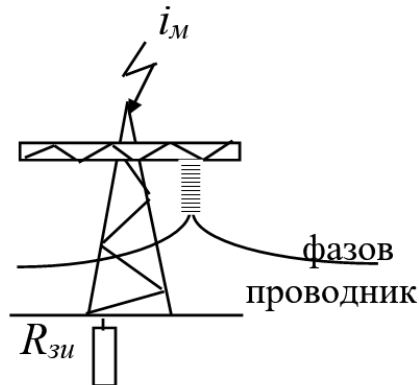
Атмосферните пренапрежения възникват при мълниеви разряди. Те достигат амплитудната си стойност за няколко микросекунди и след това бързо затихват. Кратността на тези пренапрежения може да надхвърли 10 о.е.

9.1. Пренапрежения от пряк удар на мълния върху стълб без мълниезащитен проводник (МЗП)

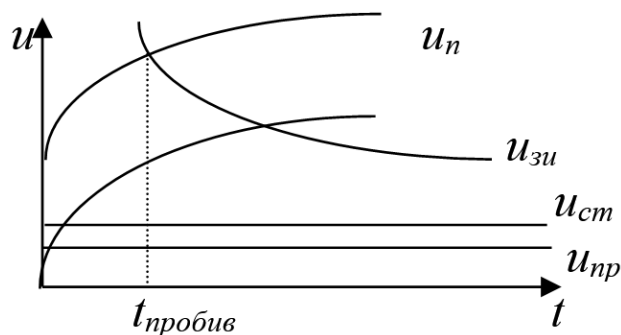
При електропроводите без МЗП попадение на мълния върху стълб (Фиг. 9.1) е малко вероятно. Пренапреженията са резултат на пад на напрежение в съпротивлението на стълба (u_{cm}), в заземлението му (u_{zu}) и от индуктиране на напрежения във фазовите проводници ($u_{пр}$).

$$(1) \quad u_{п} = u_{zu} + u_{cm} + u_{пр}$$

На Фиг. 9.2 е дадено изменението по време на съставките и на общото напрежение $u_{п}$, на което е подложена изолацията на фазовите проводници и волт-секундната характеристика на изолационна верига (крива 1) Когато електрическата якост на изолаторната верига се окаже по-ниска от $u_{п}$, възниква обратен пробив от стълб към фазов проводник при ток $I_{м} = \alpha_{м} \cdot t_{пр}$.

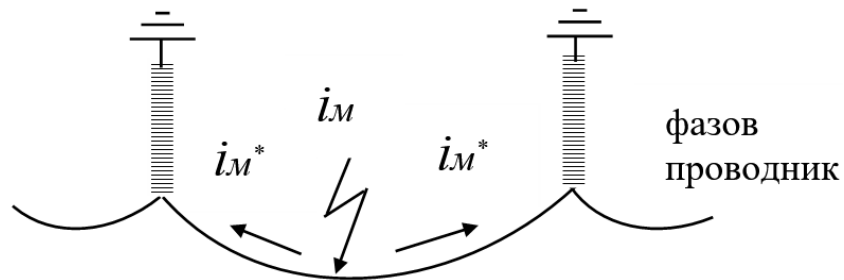


Фиг. 9.1



Фиг. 9.2

9.2. Пренапрежения от пряк удар на мълния върху фазов проводник (ФП) при електропровод без МЗП (Фиг. 9.3)



Фиг. 9.3

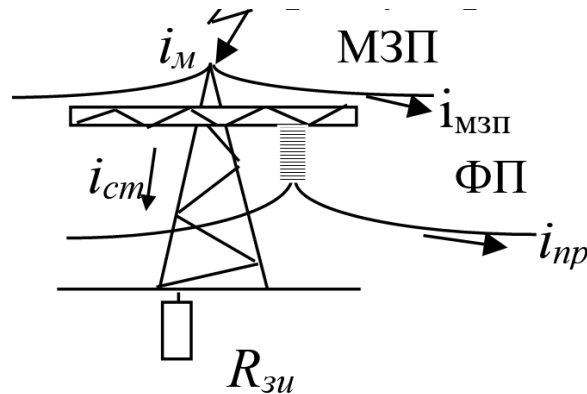
В засегнатия от мълния фазов проводник се получава пренапрежение u_n

$$(2) \quad u_n = \frac{i_M^*}{2} \cdot Z_{np} = 100 \cdot i_M = 100 \cdot a_M \cdot t.$$

За максималната стойност на възникналото пренапрежение се получава $U_n = 100 \cdot I_M$. Ако $U_n = U_{np50}$, то $I_M = U_{np50} / 100$. Величината I_M се нарича ниво на мълниеустойчивост.

9.3. Пряк удар на мълния върху електропровод с МЗП

9.3.1. Пряк удар на мълния върху стълб (Фиг. 9.4)



Фиг. 9.4

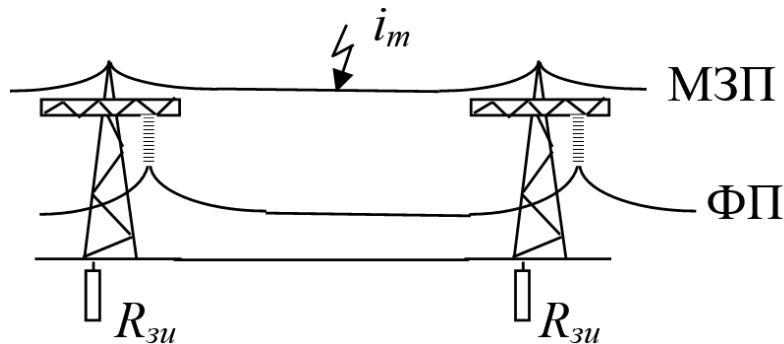
Пренапрежението, въздействащото върху изолационната система на ЕП се определя по (3).

$$(3) \quad u_n = u_{cm} - u_{np} = (i_{cm} \cdot R_{3u} + L_{cm} \frac{di_{cm}}{dt} + L_{np} \frac{di_M}{dt}) (1 - k_2)$$

Пренапрежението u_n има следните съставлящи: пад на напрежение в заземлението на стълба $u_3 = i_{cm} \cdot R_{3u}$; пад на напрежение в самоиндуктивността на стълба $u_{em,cm} = L_{cm} \frac{di_{cm}}{dt}$; индуктирано напрежение във фазов проводник $u_{em,np} = h_{np} \frac{di_M}{dt}$; напрежение,

индуцирано на проводника от разпространяващите се по МЗП вълни. Ако потенциалът на МЗП е равен на $U_{МЗП}$, то тази съставляваща на напрежението е равна на $k_2 \cdot U_{МЗП} \cdot k_2$ - коефициент на връзката между МЗП и проводника. Първите три съставлящи водят до увеличаване на напрежението върху изолацията, а последната - намалява сумарното напрежение.

9.3.2. Пряк удар на мълния върху МЗП (Фиг. 9.5)



Фиг. 9.5

Пренапрежението $U_{П,МЗП}$ може да се определи по (4)

$$(4) \quad U_{П,МЗП} = (i_M/2) \cdot (Z_{МЗП}/2) = a_M \cdot t \cdot Z_{МЗП}/4$$

Вълната по МЗП индуцира във фазовия проводник напрежение $U_{и.пр}$

$$(5) \quad U_{и.пр} = -k_2 \cdot U_{П,МЗП}$$

Въздушната изолация между МЗП и най-близкия фазов проводник, в междустълбието, където е паднала мълнията, е подложена на напрежението

$$(6) \quad U_{Уз} = 0,25 \cdot a_M \cdot t \cdot Z_{МЗП} (1 - k_2)$$

Условието за пробив на въздушната изолация е $E_{пр.ср} \cdot S < U_{Уз}$, където S - разстояние между МЗП и ФП, а $E_{пр.ср}$ е средния пробивен интензитет на електрическото поле.

9.4. Пряк удар на мълния във фазов проводник при наличие на МЗП ("провирание" на мълния) (Фиг. 9.6)

Вероятността за "провирание" на мълния - P_α се определя по (7).

$$(7) \quad P_\alpha = \alpha \cdot \frac{\sqrt{h_{cm}}}{90} - 4$$

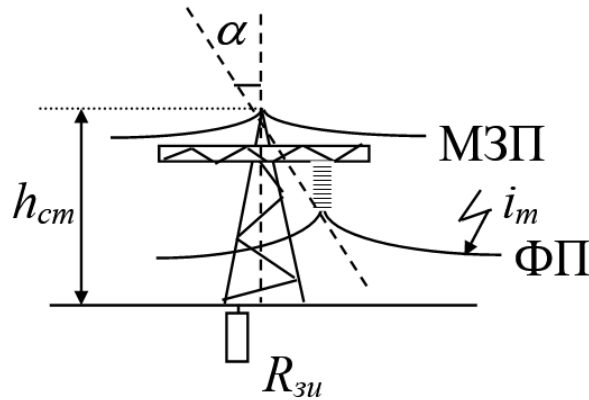
h_{cm} - височина на стълба, m , α - защитен ъгъл.

9.5. Индуцирани пренапрежения

Получават се при попадение на мълния на близко разстояние от даден електропровод. Стойността на индуцираното напрежение върху изолацията на ЕП се определя от (8).

$$(8) \quad U_{\text{инд}} = \frac{30h_{\text{пр}}}{b} I_M, \text{ kV}$$

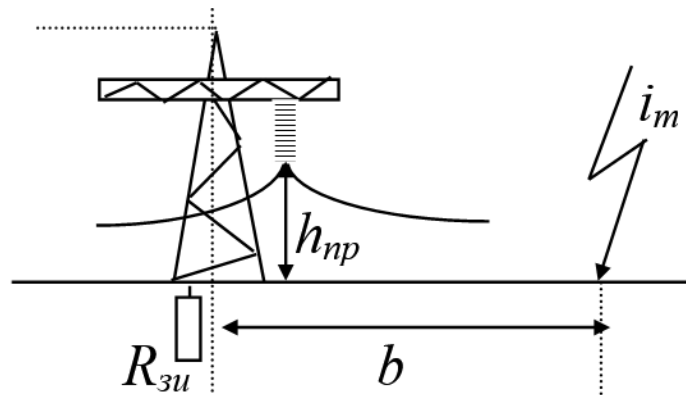
b - разстояние между мястото на попадение на мълния и ЕП, м; $h_{\text{пр}}$ - средна височина на окачване на проводника, м; I_M - ток на мълнията, кА.



Фиг. 9.6

Индуктираните пренапрежения възникват едновременно в трите фази на ЕП. Те не представляват опасност за изолацията на ЕП с клас на напрежение над 110 kV. За разпределителни мрежи (до 35 kV) индуктираните пренапрежения могат да предизвикат около един пробив в година.

9.6. Специфичен брой изключения на ЕП при попадения на мълния



Фиг. 9.7

Броят на попаденията на мълнии N върху даден ЕП за една година при мълниеносна дейност n часа и 0,067 мълнии/км е

$$(9) \quad N = 0,4 \cdot n \cdot h_{\text{пр}} \cdot L \cdot 10^{-3}$$

Броят на отказите на изолацията N_p на даден ЕП е

$$(10) \quad N_p = N \cdot P_p$$

P_p - вероятност за пробив в изолацията.

Пробивът в изолацията води до изключване на ЕП, когато импулсната дъга в мястото на повредата прерасне в силова, поддържана от работното напрежение. Вероятността за такъв преход (η) се определя в зависимост от работното напрежение. За ЕП с клас на напрежение до 220 kV $\eta=0,7$, а за по-високи класове на напрежение $\eta=1$. Годишния брой изключения за даден ЕП е

$$(11) \quad N_{изкл} = 0,4 \cdot n \cdot h_{пр} \cdot L \cdot 10^{-3} \cdot P_p \cdot \eta$$

За сравняване на мълниеустойчивостта на различни ЕП се използва критерия "специфичен брой изключения" - $n_{изкл}$, отнесен към дължина 100 km на ЕП и 100 часа мълниева дейност.

$$(12) \quad n_{изкл} = 4 \cdot h_{пр} \cdot P_p \cdot \eta$$

Като се отчете разликата в пренапреженията в зависимост от мястото на попадение на мълния в определените в зависимост от това различни вероятности за отказ на изолацията за $n_{изкл}$ се получава

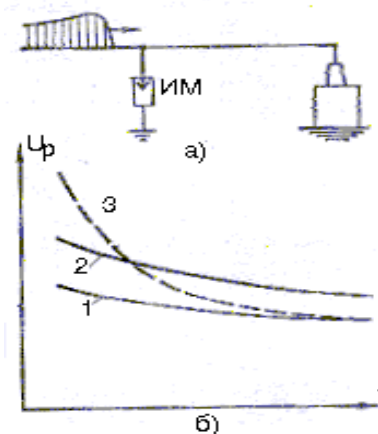
$$(13) \quad n_{изкл} = 1,2 \cdot N \cdot h_{пр} \left\{ P_{\alpha} \cdot \eta \cdot P_1 + (1 - P_{\alpha}) \left[\frac{4h_{cm}}{L} \cdot P_2 \cdot \eta_1 + \left(1 - \frac{4h_{cm}}{L} \right) (P_3 \cdot \eta_2 + P_4 \cdot \eta_1) \right] \right\}$$

P_1 - вероятност за пробив при попадение на мълния върху фазов проводник; P_2 - вероятност за пробив при попадение на мълния върху стълб; P_3 - вероятност за пробив между МЗП и ФП в междустълбието при попадение на мълния върху мълниезащитата; P_4 - вероятност за пробив на стълба при попадение на мълния върху мълниезащитата в средата на междустълбието; η_1 - вероятност за получаване на устойчива дъга при обратен пробив; η_2 - вероятност за получаване на устойчива дъга при пробив във въздушната междина в междустълбието.

ТЕМА 10. Апарати за защита от пренапрежения. Видове. Защитни характеристики. Избор

Вълните от пренапрежения, възникващи в ЕП при удар на мълнии, достигат до подстанциите и могат да представляват опасност за инсталираното там оборудване. Опасност от пробив може да възникне и на отделни места по ЕП, имащи отслабена изолация или разклонени участъци.

В такива случаи наред със защитата от преки удари се прилага и защита от постъпващи вълни, принципът на действие на която е илюстриран на Фиг. 10.1а. За да се предотврати пробив в изолацията на разглежданата изолационна система паралелно на нея се присъединява апарат за ограничаване на напрежение (ЗА). Волт-секундната характеристика на ЗА с отчитане на разсейването, задължително трябва да е разположена по-ниско от волт-секундната характеристика на защитаваната изолация. При спазването на това изискване импулса ще породи във всички случаи пробив в ЗА с последване на срез на напрежението на ИО и на изолацията и протичане на импулсен ток към земя. След затихване на импулсия ток през ЗА по йонизирания канал протича ток, обусловен от напрежението с промишлена честота наричан съпровождащ ток. Ако съоръжението работи със заземена неутрала или пробива в ИО е възникнал в две или три фази, то дъгата на съпровождащия ток може и да не угасне и импулсия пробив да премине в устойчиво късо съединение, което ще доведе до изключване на съоръжението. За да се избегне това, следва да се обезпечи гасенето на дъгата на съпровождащия ток в ИО.



Фиг. 10.1. Принцип на защита от постъпващи вълни; а - принципна схема; б - координация на волт-секундната характеристика на искровата междина и защитаваната изолация; 1 - волт-секундна характеристика на изолацията; 2,3 – волт-секундна характеристики на ИО със слабо неравномерно и силно-неравномерно поле

Устройствата обезпечавачи не само защитата на изолацията от пренапрежения, но и гасенето на дъгата на съпровождащия ток за по-кратко време от колкото е времето за действие на релейната защита се наричат защитни разрядници, за разлика от обичайните искрови междини, които са получили названието искрови отводи. Съществуват два типа отводи, които принципно се различават по начина на гасене на дъгата - тръбни и вентилни отводи. В тръбните отводи дъгата угасва поради интензивното надлъжно продухване, а във

вентилните - заради намалянето на съпровождащия ток с помощта на съпротивления, които се включват последователно на искровите междини.

Вентилните отводи са по-сложни като устройство и по-скъпи от тръбните отводи, но осигуряват по-надеждна защита на izolацията и затова са приети като основни апарати за защита на подстанциите от постъпващи вълни.

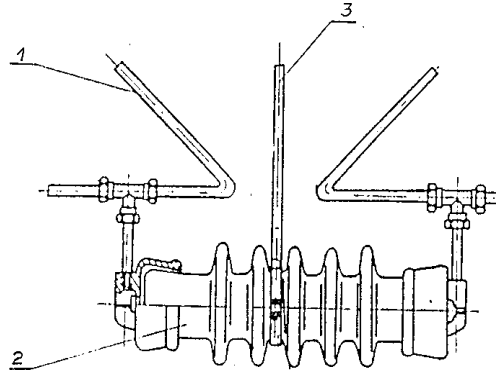
10.1. Видове защитни апарати

10.1.1. Искрови отводи (Фиг. 10.2)

Прилагат се в мрежи средно напрежение (СрН) за защита на трансформаторни постове. Недостатъците на ИО са: всеки пробив в ИО е късо съединение с големи токове, от които допълнително могат да възникнат повреди в прекъсвачи, клемни съединения и др.; ИО увеличават неколккратно броя на изключванията на ЕП от индуцирани пренапрежения. Ето защо те могат да се използват само в мрежи с АПВ; при заработване ИО генерират стръмни импулсни вълни, които са опасни за надлъжна izolация на трансформаторите. Разстоянието между електродите на ИО се подбира от следните съображения:

- ИО не трябва да заработват при някои типични комутационни пренапрежения (в мрежите за СрН това са пренапрежения при з.с.);

- импулсните пробивни напрежения на ИО трябва да са по-ниски (с резерв от около 30 %) от импулсното изоляционно ниво на защитаваните съоръжения.

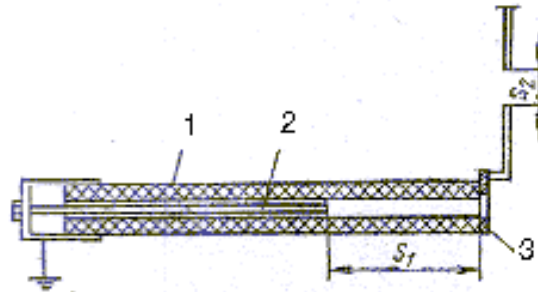


Фиг. 10.2. Искров отвод (1- изолатор, 2- електроди, 3- птицебран)

ИО имат едно съществено предимство пред останалите защитни апарати - те са просто, сигурно в експлоатационни условия и много евтино защитно средство.

10.1.2. Тръбни отводи (ТО) (Фиг. 10.3)

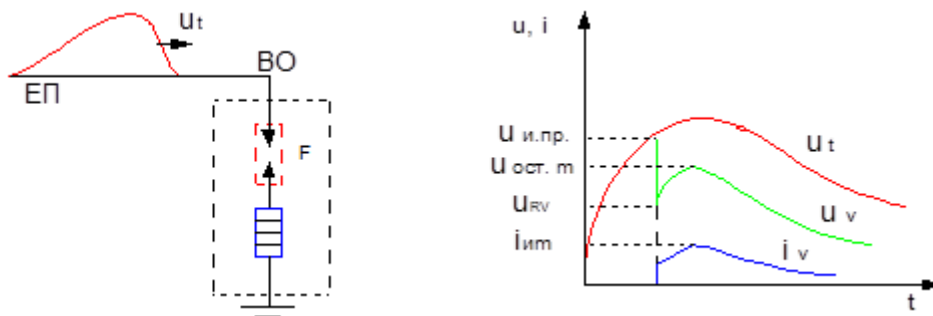
В ТО дъгата угасва поради интензивното надлъжно продухване. ТО се използват в някои страни като допълнително защитно средство от атмосферни пренапрежения в мрежите за СрН и у нас не са намерили приложение. Основният им недостатък е свързан със стръмната волт-амперна характеристика. Други недостатъци са нестабилните им характеристики и необходимостта от осигуряване на зона за изхвърляне на газовете, генерирани при заработване.



Фиг. 10.3. Тръбен отвод (1 - тръба от газо-генериращ материал; 2,3- електроди)

10.1.3. Вентилни отводи с искрова междина (ВО ИМ)

Във ВО ИМ дъгата угасва поради намалянето на съпровождащия ток (i_v) (Фиг. 10.4) с помощта на нелинейни съпротивления (R_v), които се включват последователно на искровите междини (F).



Фиг. 10.4. Пояснения към принцип на действие на ВО ИМ: а - условна схема на свързване на ВО ИМ; б - времева зависимост на фази на действие (u_t - постъпваща вълна на пренапрежение)

Параметри на ВО ИМ: *пробивно напрежение на ВО* - ефективна стойност на напрежение с промишлена честота, при което възниква пробив в искровата междина (ИМ); *импулсно пробивно напрежение на ВО* ($U_{и.пр.}$) - моментна стойност на пренапрежение с нормирана апериодично затихваща форма, при която възниква пробив в ИМ; *остатъчно напрежение на ВО* ($U_{ост.м}$) - върхова стойност на напрежението след пробив в ИМ при въздействие на напрежение с апериодично затихваща форма; *защитни нива* - най-големите напрежения на изводите на отвода, подложен на стандартни импулсни вълни. Дефинират се за атмосферни и комутационни вълни; *пропускателна способност* - възможността ВО да проведе без повреда дадена последователност от токови импулси с определена форма и големина.

10.1.4. Металоксидни вентилни отводи (МОВО)

Най-модерните защитни отводи имат свършено друг принцип на ограничаване на пренапрежения. Те нямат искрови междини, а се състоят от нелинейни резистори, изработени от ZnO и от други метални оксиди. При пренапрежение на изводите на отвода токът през него нараства съгласно волт-амперната характеристика на резисторите непрекъснато и без закъснение. МОВО преминават плавно в проводимо състояние. След затихване на пренапрежението токът става отново малък съгласно волт-амперната

характеристика. За разлика от ВО с ИМ съпровождащ ток протича само във времето на високо проводимо състояние..

Защитни характеристики на МОВО: *защитно ниво (U_p)* - максималното напрежение на изводите на отвода при протичане на номиналния отвеждащ ток, който има форма 8/20 μ s, *защитно ниво при стръмен фронт на вълната* и *защитно ниво при комутационни пренапрежения*.

10.2. Избор на ВО

10.2.1. Избор на ВО ИМ

1) Максимално допустимото напрежение на отвода трябва да е по-голямо от трайните пренапрежения на мястото на монтажа при несиметрични земни съединения в мрежата;

2) Изолационните нива на защитаваните съоръжения трябва да са по-големи (с необходимия резерв) от защитните нива на отвода. Необходимият резерв е 20-40 %, ако ВО е непосредствено до съоръжението, но трябва да е по-голям, ако те са отдалечени;

3) ВО трябва да има необходимата пропускателна способност, съобразно очакваните пренапрежения.

10.2.2. Избор на МОВО

1) Определяне на трайното работно напрежение (U_c)

- U_c трябва да бъде по-голямо от трайно приложеното на изводите на отвода напрежение с промишлена честота.

- $T.U_c$ трябва да бъде по-голямо от очакваното временно пренапрежение на изводите на отвода (T - коефициент на издържливост на временни пренапрежения).

2) Определяне на енергийната издържливост на МОВО

За да могат отводите да работят сигурно в мрежата, тяхната способност за поемане на енергия трябва да бъде по-голяма от очакваното енергийно натоварване при задействане. Енергията, поета от МОВО (W) може да се определи от равенството:

$$W = [(U_L - U_{res}) / Z] \cdot U_{res} \cdot 2 \cdot T \cdot n$$

U_L - очаквано пренапрежение или зарядното напрежение на ЕП, kV; U_{res} - остатъчно напрежение върху отвода, kV; Z - вълново съпротивление на ЕП (въздушен или кабелен), Ω ; T - време за разпространение на вълната, μ s; n - брой последователни разряди.

ТЕМА 11. Координация на изолацията

Координация на изолацията е съгласуване на изолационните нива на електрическите съоръжения с пренапреженията в мрежата (атмосферни, комутационни, трайни) и с характеристиките на защитните средства, така че броят на пробивите в съоръженията за единица време да не надхвърля избран технически и икономически оправдан минимум.

Изолационното ниво ($U_{из}$) на електросъоръженията характеризира специфичните изисквания към изолационните им системи според тяхното предназначение, номинално напрежение и форма на въздействащите напрежения.

Изолационното ниво се доказва от стандартно определени изпитвателни напрежения (нормирани издържани напрежения) или по технически условия на изпълнение на дадено съоръжение, определени от производителя.

При въздействие на атмосферни пренапрежения допустимото изолационно ниво е $U_{из.а.доп} = 1,1 \cdot (U_{и.н} - 0,5 \cdot U_{и.н})$, kV_{max} ; $U_{и.н}$ - върхова стойност на нормирано импулсно изпитвателно напрежение. Според IEC, $U_{и.н}$ се означава като BIL (издържано импулсно напрежение), а $U_{из.а.доп}$ с LIWL (издържимо ниво на мълниев импулс). Допустимото изолационно ниво за вътрешни пренапрежения е $U_{из.в.доп} = \delta_v \cdot \delta_k \cdot U_{-u}$, kV_{eff}

δ_v – поправъчен коефициент за вътрешни пренапрежения (1,15÷1,3); δ_k – коефициент на кумулативност (0,9); U_{-u} – ефективна стойност на нормирано изпитвателно напрежение с промишлена честота (издържано напрежение с промишлена честота).

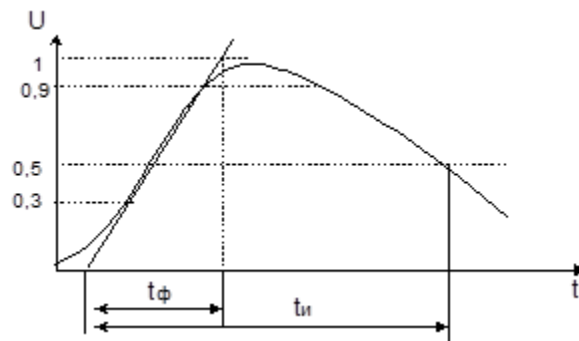
В Таблица 11.1 са дадени стойности за $U_{из.а.доп}$, $U_{из.в.доп}$ за някои класове напрежения.

Таблица 11.1

U_n , kV	U_m , kV	Издържани напрежения	
		с промишлена честота	импулсна вълна
		$U_{из.в.доп}$, kV	$U_{из.а.доп}$, kV
10	12	28	75
20	24	50	125
110	125	185	450
		230	550
220	245	325	750
		360	850
		395	950
		460	1050

Стандартно определени са още и издържано ниво на комутационен импулс – SIWL и издържано ниво на срязана вълна – CWWL.

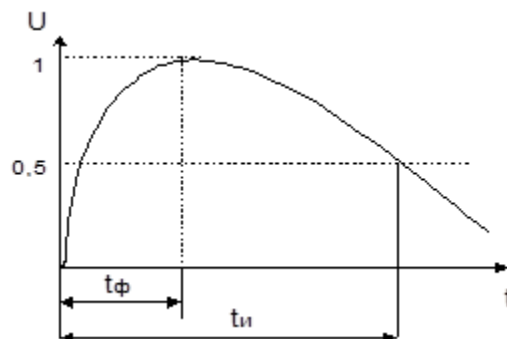
За съоръжения с номинално напрежение под 300 kV нормираното изолационно ниво се определя от издържаното импулсно напрежение и от издържаното напрежение с промишлена честота. За съоръжения с напрежение над 300 kV – от издържаните напрежения при мълниев и при комутационен импулс. Издържано напрежение при мълниев импулс (BIL) е предписаната от стандарта амплитудна стойност на напрежението на стандартен импулс (1,2/50) (Фиг. 11.1), която съоръжението трябва да издържи при диелектричните изпитвания.



Фиг. 11.1. Стандартен мълниев импулс

Издържано ниво при комутационен импулс – амплитудна стойност на стандартен комутационен импулс (250/2500) (Фиг. 11.2).

Издържано напрежение с промишлена честота – предписана от стандарта ефективна стойност на напрежението с промишлена честота, което то трябва да издържи при диелектричните изпитвания в течение на една минута.



Фиг. 11.2. Стандартен комутационен импулс

Съществуват два методически подхода за координиране на изолацията – детерминистичен и статистичен.

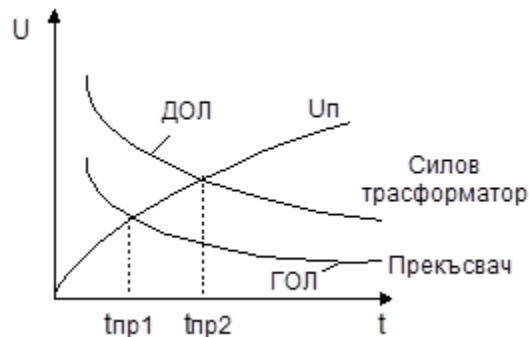
Детерминистичния се основава на изчислителните стойности на пренапрежения, които условно се приемат за максимално възможни пренапрежения в мрежата, и от нормираните изолационни нива, които фактически са минималната изолационна якост на съоръженията. Отношението между минималната изолационна якост и максималните пренапрежения е коефициентът на сигурност - k_c (характеризира заложения ресурс на

електрическа якост и може да има стойност от 8 до 20). Той не трябва да е по-малък от определени препоръчвани стойности. Илюстрация на детерминистичния подход е показана на Фиг. 11.3.



Фиг. 11.3. Илюстрация на детерминистичния подход за координация на изолацията

За координиране на изолацията спрямо импулсни въздействия горната ограничителна линия (ГОЛ) на съоръжение с по-малка степен на важност (напр. прекъсвач) трябва да бъде разположена под долната ограничителна линия (ДОЛ) на съоръжение с по-голяма степен на важност (напр. силов трансформатор) (Фиг. 11.4).



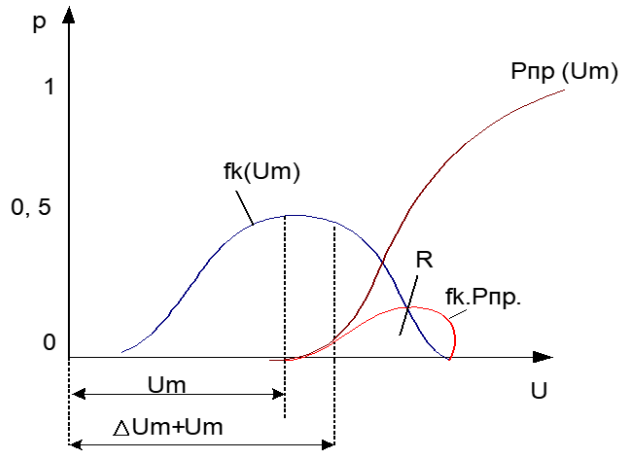
Фиг. 11.4. Координация на изолацията чрез волт-секундните характеристики на съоръженията (U_p - постъпваща вълна на пренапрежение; $t_{пр1}$ и $t_{пр2}$ - пробивни времена)

Статистическият подход за разлика от детерминистичния по принцип е приложим само за съоръжения със самовъзстановяваща се изолация. При него се изхожда от вероятното разпределение на амплитудните значения на очакваните пренапрежения и от КИЕ, т.е. предполага се, че пренапреженията в мрежата и издържаните напрежения на съоръженията могат да приемат (с определена вероятност) всички стойности между най-малките и най-големите си значения. Тези вероятностни разпределения за конкретната мрежа трябва да са известни. От тях се изчислява т.н. "риск за пробив", който не трябва да надвишава препоръчаните му стойности (Фиг. 11.5), определени от лабораторни изпитвания и практическия опит.

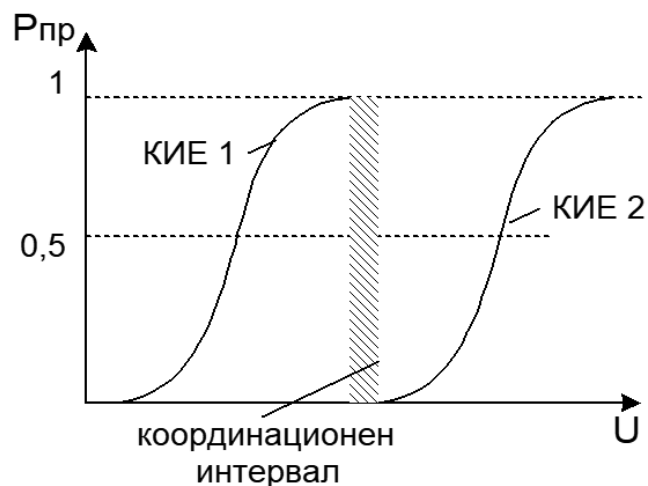
Координация на изолацията се осъществява чрез използване на кривите на импулсен ефект (Фиг. 11.6). Необходимо е $U_{пр 100\%}^{(1)} < U_{пр 0\%}^{(2)}$.

Детерминистичният подход има преобладаващо практическо приложение. Статистическият теоретически е по-издържан, но за приложението му е необходимо да се

познават достатъчно точно вероятностните характеристики на пренапреженията и на изолацията на съоръженията в конкретната мрежа. Използва се само за оценка на координацията на изолацията на съоръжения със самовъзтановяваща се изолация, които не са непосредствено защитени с вентилен отвод.



Фиг. 11.5. Илюстрация на вероятностна оценка за отказ на изолационна система



Фиг. 11.6. Координация на изолацията чрез кривите на импулсен ефект на съоръженията (КИЕ1 - на по-неотговорно съоръжение)

ДОПЪЛНИТЕЛНА ЛИТЕРАТУРА

[1] М. Василева. Техника на високите напрежения. ТУ-Варна, 2007.