

УДК 621.311.4:551.5

Ліщак І.В., ст.викл. каф. ЕСМ, Бінкевич Т.В., студент 3 курсу ІЕСК
Національний університет «Львівська політехніка»

ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ПРОБОЇ ПОВІТРЯНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ

Розглянуто фізичні процеси при пробі повітряної ізоляції. Також розглянуто доцільність використання діелектричних властивостей повітря в енергетичних установках різних класів напруги, а також переваги та недоліки повітряної ізоляції цілому.

Ключові слова: повітряна ізоляція, пробій, іонізація, стример, лідер, лавина електронів.

Ізоляція електроустановок може бути розділена на зовнішню і внутрішню. До зовнішньої ізоляції відносяться повітряні проміжки (наприклад, між проводами ЛЕП, між проводами і опорою) і частини ізоляційних конструкцій, які стикаються з повітрям. Внутрішня ізоляція знаходиться всередині корпусу трансформатора або апарату, кабельної оболонки і т.д., вона складається з комбінації різних рідких, твердих і газоподібних діелектриків.

Доцільність використання діелектричних властивостей повітря в енергетичних установках різних класів напруги пояснюється меншою вартістю і порівняльною простотою створення ізоляції. Для її виконання ізолювані електроди (проводи, шини тощо) розташовуються на певних відстанях один від одного і від землі і закріплюються за допомогою ізоляційних конструкцій з твердих діелектриків - ізоляторів. При цьому чисто повітряні проміжки і проміжки в повітрі вздовж поверхонь ізоляторів утворюють зовнішню ізоляцію установки.

Для зовнішньої ізоляції характерна залежність електричної міцності від метеорологічних умов, що визначають стан основного діелектрика - повітря, а також стан поверхонь ізоляторів, тобто кількість і властивості забруднень на них. На розрядні напруги повітряних проміжків впливають тиск P , температура T і абсолютна вологість повітря H , а на розрядні напруги вздовж ізоляторів зовнішньої установки - крім того, вид та інтенсивність атмосферних опадів, кількість і склад забруднень в атмосфері та вітрові умови.

Показники метеорологічних умов безперервно змінюються в часі, тому повітряні ізоляційні проміжки вибирають так, щоб вони мали необхідну електричну міцність і при таких несприятливих умовах. Зовнішня ізоляція має здатність швидко відновлювати свою електричну міцність до вихідного рівня після пробію і відключення від джерела напруги.

Основний діелектрик зовнішньої ізоляції - атмосферне повітря не підвладне процесам старіння, тобто незалежно від впливів напруг і режимів роботи обладнання його середні характеристики залишаються незмінними в часі.

Електрична міцність повітря при нормальних умовах становить 25 - 30 кВ при відстанях між електродами більше 1 см. Тому ізоляційні відстані по

повітря в установках високої і надвисокої напруги досягають декількох метрів. Розміри ж електродів (проводів, шин тощо), обраних за густиною струму, механічної міцності і інших умов, виявляються порівняно невеликими, і радіуси кривизни їх поверхонь становлять не більше одиниць сантиметрів. При таких співвідношеннях розмірів електродів і міжелектродних відстаней електричні поля в зовнішній ізоляції виходять різко неоднорідні. Електрична міцність повітря в таких полях значно нижча: при відстанях близько 1 м вона становить 5 - 6 кВ / см, а при відстанях близько 10 м знижується ще приблизно в два рази і продовжує падати при подальшому збільшенні міжелектродних відстаней. Тому з ростом номінальної напруги габаритні розміри і вартість зовнішньої ізоляції значно зростає. Крім того, при різко неоднорідних полях у зовнішній ізоляції можливий коронний розряд, який викликає додаткові втрати енергії та інтенсивні радіоперешкоди.

У зв'язку з цим велике значення мають заходи щодо зменшення рівня неоднорідності електричних полів, які дозволяють обмежити потужність втрат на корону до економічно виправданого рівня, знизити інтенсивність радіоперешкод до допустимих значень, а також дають деяке збільшення розрядних напруг.

Збудження та іонізація атомів і молекул. Лавина електронів. Несамостійний і самостійний розряди.

У нормальному стані неіонізовані гази є майже ідеальними діелектриками. Цей стан порушується при напруженості поля, при якій в газі під дією сил поля виникає інтенсивна іонізація - газовий розряд. При газовому розряді різко зростає струм, що стікає з електродів. Цей струм є струмом конвекції, який обумовлений рухом заряджених часток між електродами. Щоб описати газовий розряд, необхідно зрозуміти умови виникнення, руху та зникнення заряджених частинок в електричному полі.

Процес відриву електрона від нейтральної молекули називається іонізацією. Для іонізації молекули потрібно затратити енергію. Процес збудження - процес переходу електрона на більш віддалену орбіту, яка може також проходити в мікропроцесах газового розряду; збуджена молекула «живе» $\approx 10^{-10}$ с, потім відбувається зворотний перехід електрона на стійку орбіту. Далі слід розглянути основні процеси, при яких молекулі в розрядному проміжку передається енергія достатня для її іонізації.

Ударна іонізація чи іонізація зіткненням. Так називається іонізація при зіткненні молекули з електроном, прискореним в електричному полі. У результаті іонізації зростає число вільних електронів - відбувається розмноження електронів. Схема іонізації молекули при зіткненні з електроном показана на рис. 1.



Рис.1. Схема ударної іонізації.

Ударна іонізація в газах виникає в досить сильних полях, але менших, ніж поля, в яких пробиваються рідкі та тверді діелектрики. *Фотоіонізація* - це іонізація в результаті поглинання молекулою квантів променистої енергії, тобто фотонів. Процес фотоіонізації схематично зображений на рис. 2. Енергія фотона виражається формулою $w=h\nu$, де ν - частота випромінювання, c^{-1} ; h -стала Планка. Тоді умова іонізації виражається формулою

$$h\nu_i \geq U_i. \tag{1}$$

З умови (1) випливає, що підвищення частоти збільшує здатність фотона до іонізації. У газовому розряді джерелом фотонів, здатних до іонізації, служать не тільки зовнішні випромінювачі, але і самі молекули, що беруть участь в газовому розряді. У збудженої

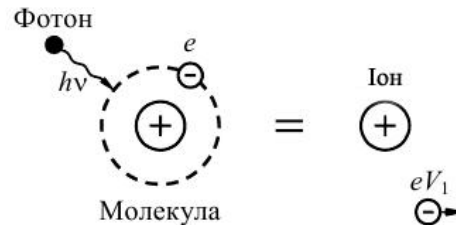


Рис.2. Схема фотоіонізації.

молекули електрон, зміщений на зовнішню нестійку орбіту, утримується на ній протягом дуже короткого проміжку часу $\approx 10^{-10}$ с. При поверненні електрона на стійку орбіту молекула випромінює фотон, який здатний викликати фотоіонізації нейтральних або вже збуджених інших молекул газу.

Процес, що включає порушення молекули газу в результаті зіткнення, випромінювання фотона при поверненні електрона на стійку орбіту та іонізацію цим фотоном раніше збудженої молекули, зображений на рис. 3. Процес іонізації вторинними фотонами грає вирішальну роль у формуванні іскрового розряду.

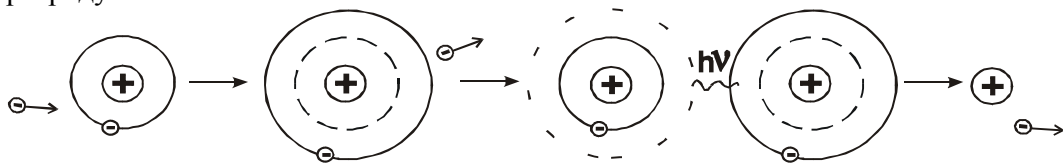


Рис.3. Схема іонізації збудженої молекули.

Електрон в результаті зіткнення збуджує молекулу, при поверненні електрона на стійку орбіту випромінюється фотон, іонізуючи іншу збуджену молекулу.

Термоіонізація. Температура є мірою кінетичної енергії хаотичного (теплого) руху молекул і вільних електронів у газі. Величина цієї кінетичної енергії визначається для молекули виразом

$$W = 3/2kT, \tag{2}$$

де W - кінетична енергія теплового руху для молекули; k - постійна Больцмана; T - температура. При досить високій температурі стає можливою іонізація в результаті зіткнення молекул з електронами. Процес термоіонізації відіграє визначальну роль в стовпі електричної дуги, температура якого складає від 4000 до 15000 °К.

Поверхнева іонізація. У ряді випадків у розвитку електричного розряду в газовому проміжку істотну роль може грати поверхнева іонізація. Так називається ефект випускання з електродів заряджених частинок, в основному вільних електронів. Електрони, що вивільняються в результаті поверхневої іонізації з катода, силами електричного поля відводяться від катода в область газового розряду. При поверхневій іонізації з анода електрони знову притягуються до аноду і поглинаються ним. Тому для розвитку газового розряду основне значення має поверхнева іонізація з катода, яка має різні форми:

а) поверхнева ударна іонізація відбувається під дією бомбардування поверхні катода позитивними іонами, прискореними в електричному полі (рис. 4). Для того щоб звільнити з катода один електрон, тобто для одноразової поверхневої іонізації, позитивний іон повинен вільно пролетіти в полі напруженості E відстань $X_{п.і} = U_{п.і} / E$;

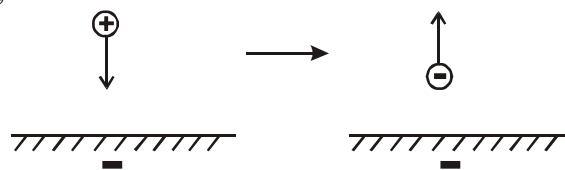


Рис.4 Схема ударної поверхневої іонізації

б) поверхнева фотоіонізація (фотоелектронна емісія) відбувається при падінні на поверхню катода фотонів досить високої енергії (Рис. 5,а);

в) термічна емісія електронів з катода - це емісія, при якій вільні електрони в металі за рахунок його нагрівання набувають енергію, достатню для подолання поверхневого потенційного бар'єру (Рис. 5,б);

г) автоелектронна емісія полягає в тому, що електрони під дією сил електричного поля вириваються з катода. Автоелектронна емісія відбувається при напруженості поля поблизу катода $3 \cdot 10^2$ кВ / см. (Рис. 5,в)

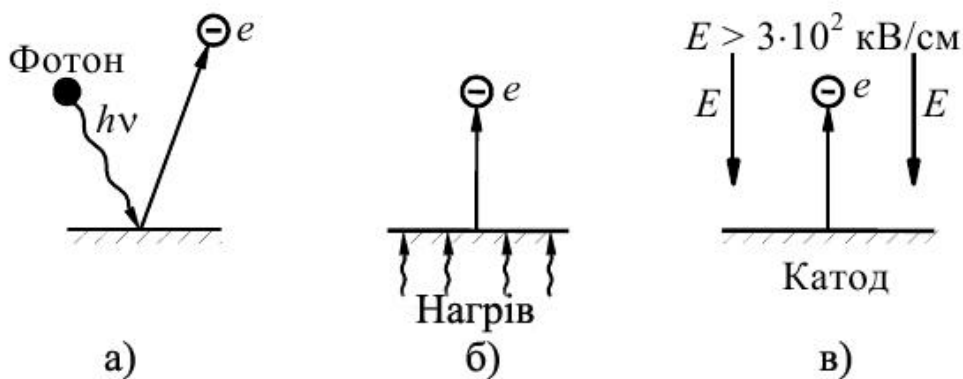


Рис. 5. Схеми поверхневої іонізації: а) - іонізація квантом світла; б) - термоіонізація; в) - автоелектронна іонізація

Лавина електронів. Якщо напруженість електричного поля досягає значення, при якому можлива ударна іонізація, то в полі виникають лавинні процеси, в яких відбувається розмноження заряджених частинок - електронів та іонів.

Можна припустити, що у будь-якій точці поля з напруженістю E виник вільний електрон, що володіє енергією, достатньою для іонізації молекул газу. Цей початковий електрон може виникнути, наприклад, в результаті фотоіонізації молекул газу будь-яким зовнішнім іонізатором. Цей електрон іонізує молекулу, що призводить до утворення позитивного іона і двох електронів. Розганяючись в електричному полі, кожен з цих електронів в свою чергу іонізує по молекулі, що призводить до утворення трьох позитивних іонів і чотирьох електронів, і т.д. Цей лавиноподібний процес зображений на рис. 6.

Електрони та іони, що утворилися в лавині, переміщуються під дією електричного поля. Так як рухливість електронів багато більше рухливості іонів, то в голові лавини утворюється надлишок електронів, а в її хвості переважають позитивно заряджені іони.

Самостійний розряд. Для утворення лавини необхідний хоча б один початковий електрон. У тому випадку, коли початкові електрони безперервно відтворюються, лавинний процес не припиняється. Початкові електрони можуть створюватися зовнішніми іонізаторами, в цьому випадку розряд називається несамостійним. Відтворення початкових електронів може відбуватися і за рахунок іонізаційних процесів у самій лавині. У цьому випадку процес носить самопідтримуючий характер, і розряд називається самостійним.

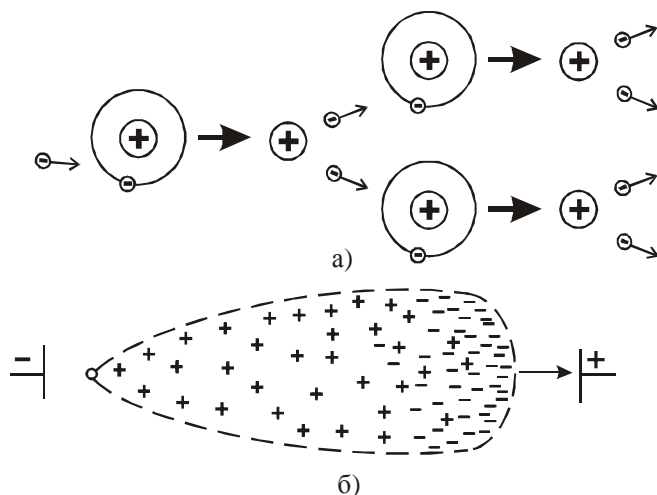


Рис. 6. Схема утворення лавини електронів (а) і розподіл у ній заряджених часток (б)

Іонізація в лавині супроводжується збудженням частини молекул і випромінюванням фотонів. Випромінювані фотони можуть викликати вторинну іонізацію в газі або на катоді.

Умовою самостійного розряду є умова, при якому розряд буде підтримуватися, якщо навіть дія зовнішнього іонізатора припиниться. Однак для початку розвитку розряду необхідний вихідний початковий електрон. Умова самостійного розряду:

$$\gamma(e^{\alpha S} - 1) \geq 1. \tag{3}$$

Якщо $\gamma(e^{\alpha S} - 1) \geq 1$ буде навіть незначно перевищувати одиницю, число лавин, які розвиваються в проміжку, буде безперервно зростати. Наступні лавини будуть виникати ще до того, як всі позитивні іони попередніх лавин підуть на катод. Отже, електрони будуть рухатися в об'ємі, заповненому позитивними іонами, і вздовж шляху лавин газ, в проміжку між електродами, перейде в стан плазми. У випадку однорідного поля умова самостійності розряду є умовою пробою проміжку, тому воно може бути використана для визначення пробивної напруги.

Перехід від лавинної форми самостійного розряду до іскрового розряду в малих іскрових проміжках з рівномірним полем. Виникнення стримерів.

У розріджених газах кожна лавина веде до наростання числа початкових електронів, що ініціюють наступну лавину. В результаті в кожній наступній лавині зростає число іонізації. Цей процес наростає за експоненціальним законом, поки проміжок між електродами не заповниться плазмою, що складається з позитивних іонів, що залишилися від попередніх лавин, і електронів, створених останньої лавиною. Через високу розрідженості газу основну роль у вторинній іонізації, що створює нові початкові електрони, грає фотоіонізація з катода. Тому на розрядну напругу проміжку помітно впливає матеріал катода, що характеризується потенціалом поверхневої іонізації.

При високій щільності газу спостерігається інша картина розвитку самостійного розряду. Спотворення поля позитивними зарядами лавини виявляється в цьому випадку значним, що призводить до виділення великої кількості фотоіонів та інтенсивної фотоіонізації в обсязі газу поблизу головки лавини (рис. 7,а). Утворені вторинні лавини направляються до голівки первинної лавини, де напруженість поля особливо велика. Електрони вторинних лавин проникають всередину первинної лавини, утворюючи з її позитивними іонами канал плазми. Напруженість поля на кінці каналу (з боку катода) підвищується, що веде до виникнення нових вторинних лавин і до подальшого проростання плазмового каналу і т.д. Такий канал отримав назву стримера (англ. stream - потік). Коли стример досягає катода, плазмовий канал замикає електроди й розряд переходить в іскрову стадію.

Таким чином, у малих проміжках і в щільних газах розряд протікає в одній лавинній формі, що переходить у стримерну. Основну роль в утворенні вторинних лавин грає фотоіонізація в об'ємі газу, тому матеріал електрода не робить помітного впливу на напругу іскрового розряду.

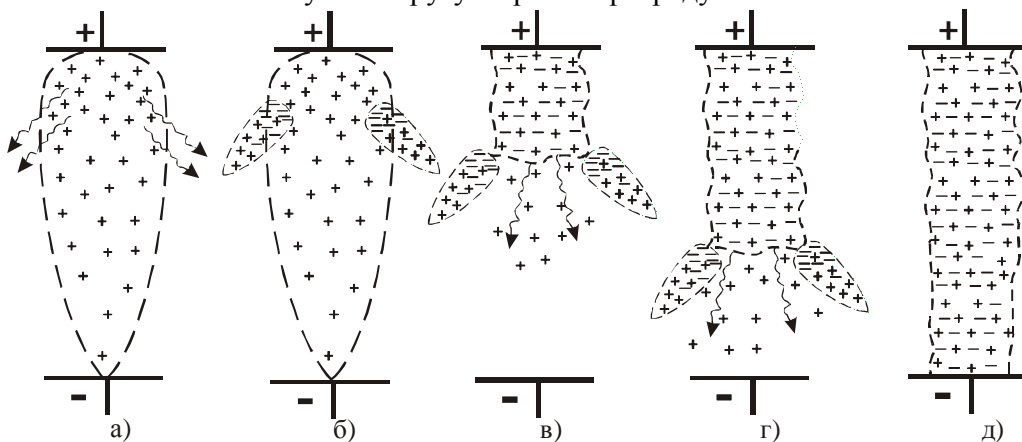


Рис.7. Схема розряду стримерної форми в малому проміжку з рівномірним полем:

а - початкова лавина перетнула проміжок; головка лавини інтенсивно випускає фотони; б - фотоіонізація породила вторинні лавини; електрони вторинних лавин проникають всередину первинної лавини; почалося утворення плазмового каналу - стримера; в, г - на кінці плазмового каналу різко збільшується напруженість поля, що призводить до інтенсивної фотоіонізації і виникнення нових лавин; плазмовий канал швидко проростає до катода (позитивний стример); д - стример досяг катода; розряд переходить в іскрову стадію.

Самостійний розряд в нерівномірному полі. Лавинна корона

У нерівномірному полі залишаються в силі основні закономірності самостійного розряду, але внаслідок зміни E вздовж шляху лавини умова самостійного розряду набуває вигляду:

$$\int_0^s \alpha dx = \ln\left(1 + \frac{I}{\gamma}\right) = const, \quad (4)$$

де α - коефіцієнт іонізації.

Далі розглянемо характеристику самостійного розряду поблизу електрода з малим радіусом кривизни, наприклад проводу. Лавинний процес виникає на певному шляху S поблизу електрода; за ділянкою S напруженість поля вже недостатня для іонізаційних процесів. За умови дотримання рівності (4) розряд на ділянці S має самостійний характер. Проте в даному випадку лавинний процес не призводить безпосередньо до іскрового розряду, так як іонізаційні струми обмежені великим ємнісним опором решти проміжку. Розряд в такій формі отримав назву коронного розряду (корона). Коронний розряд виникає при деякій початковій напруженості поля E_n або початковій напрузі U_n . Характер коронного розряду істотно залежить від полярності електрода.

Стримерна корона

Повторні лавини у коронному розряді призводять до високої концентрації позитивних іонів біля коронного вістря. При незначному підвищенні напруги на проміжку відносно початкового, коронне поле E_q , що створюється цими зарядами, стає порівняльним (у даній області) з основним полем E . Внаслідок цієї умови у коронному розряді виникають стримери.

Утворення позитивного (анодного) стримера в лавинному коронному розряді показано на рис. 8.

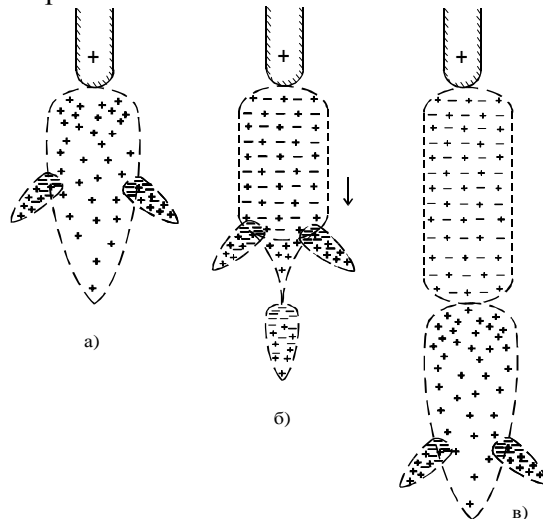


Рис. 8. Розвиток позитивного стримера в нерівномірному полі:

а - закінчився розвиток початкової лавини; виникають вторинні лавини, що направляються до голівки початкової лавини; б - по каналу початкової лавини розвивається стример, в глибині проміжку виникає вторинна лавина; в - стример заповнив канал початковою лавиною; завершився розвиток вторинної лавини в глибині проміжку.

Фотони, що виникають в головці лавини, призводять до утворення вторинних лавин попереду і з боків головки первинної лавини. Вторинні лавини втягуються в первинну лавину, утворюючи плазмовий канал, по якому електрони спрямовуються до аноду. Так як розвиток лавин і плазмового каналу призводить до посилення поля в глибині проміжку, одночасно з розвитком плазмового каналу попереду нього відбувається виникнення і розвиток нових лавин. Ця одночасність забезпечує високу середню швидкість просування фронту позитивного стримера.

Негативний стример також виникає при достатній концентрації позитивних зарядів в головці лавини і розвивається в результаті злиття ряду лавин у вигляді каналу, який швидко розширюється. Проте виникнення негативного стримера ускладнюється низькою напруженістю електричного поля поза вузькою зоною іонізації у стрижня. Просування катодного стримера вглиб проміжку стримується впливом позитивного об'ємного заряду лавин, що підсилює поле в тій частині проміжку, яка вже перетнута лавинами, і різко послаблює поле в іншій частині проміжку. Тому виникнення вторинних лавин попереду стримерного каналу стає можливим тільки після того, як стримерного канал розвинеться по всій довжині первинної лавини. Таким чином, середня швидкість просування катодного стримера виявляється менше, ніж анодного.

Перехід стримера в іскровий розряд в проміжках з нерівномірним полем
При підйомі напруги на проміжку з нерівномірним полем, довжина стримерів зростає, поки один з стримерів не перетне весь проміжок і не відбудеться іскровий розряд між електродами. У проміжках з симетричними електродами зазвичай утворюються зустрічні стримери позитивної та негативної полярності. Іскровий розряд в повітрі, в проміжках з між електродною відстанню в десятки сантиметрів, відбувається при середніх напруженостях поля близько 10 кВ / см, що значно менше критичної напруженості самостійного розряду в рівномірному полі. Пояснюється це характером стримерного розряду: стример призводить до спотворення поля в непробитій частині проміжку і до підвищення напруженості поля поблизу головки стримера.

Коли стример замикає проміжок, по каналу стримера починає проходити струм розряду між електродами. При цьому підвищується температура каналу і виникає інтенсивна термічна іонізація, що приводить до підвищення провідності плазмового каналу, підвищенню струму розряду між електродами і т. д. В результаті за дуже малий проміжок часу, близько 10^{-8} с, формується іскровий канал високої провідності, який яскраво світиться і замикає проміжок між електродами.

По дорозі іскрового розряду починає проходити струм короткого замикання між електродами. Іскра при цьому може перейти в стадію дугового розряду, для якої характерні дуже малі напруженості в розрядному каналі.

Лідерна стадія розряду

Лідер являє собою добре провідний плазмовий канал. Коли лідерний канал досягає кінця стримера, настає пауза. Лідер внаслідок його високої провідності можна уподібнити металевому стрижню, що виходить з електрода.

Високі напруженості на кінці такого стрижня призводять до утворення нового стримера, що продовжує розрядний канал. Такий механізм розвитку розряду дозволяє лідеру перекидатися великі відстані при відносно малих середніх напруженостях поля.

Іскра

Іскра в електричних мережах виникає в результаті пробією повітряної ізоляції під дією імпульсу комутаційного або атмосферного перенапруження. На фронті імпульсу у міру зростання струму плазмовий канал сильно розігрівається і розширюється. Розширення відбувається у формі циліндричної ударної хвилі. Щільність газу від центру каналу до його периферії наростає дуже круто. На периферії каналу створюється оболонка високої щільності, що охоплює центральну частину каналу, де газ сильно розріджений і сильно іонізований. У міру розширення каналу щільність оболонки знижується. У початковій фазі розширення каналу носить характер вибуху. Ударна акустична хвиля створює характерний тріск іскрового розряду.

Довга дуга в повітрі

Дуговий розряд в установках високої напруги виникає між електродами під дією робочої напруги слідом за іскровим розрядом при $E_{роб} > E_{кр}$. У всіх випадках прагнуть до якнайшвидшого згасання дуги. Майже всю довжину дуги займає плазмовий стовп. При зіткненнях електрони віддають енергію молекул, збільшуючи їх кінетичну енергію, тобто підвищуючи температуру газу. При високому тиску температура дуги лежить в межах 4000 – 15000 °К, що забезпечує інтенсивну термічну іонізацію.

Електрони надходять в дугового стовпа за рахунок термоелектронної емісії з катода, розігрітого дугою. Перехід електронів з електрода в газ забезпечується прикатодним падінням напруги, величина якого становить усього кілька десятків вольт. Якщо падіння напруги в приелектродних областях дуже мале в порівнянні з падінням напруги на плазмовому стовпі, дугу називають довгою. Енергія, що підводиться із зовнішнього електричного кола до довгій дузі, виділяється в основному в плазмовому стовпі, так що характеристики довгою дуги та її стійкість повністю визначається процесами в стовпі дуги. В установках високої напруги дуга в повітрі практично завжди є довгою.

Висновки:

Ізоляція електроустановок може бути розділена на зовнішню і внутрішню. Доцільність використання діелектричних властивостей повітря в енергетичних установках різних класів напруги пояснюється меншою вартістю і порівняльною простотою створення ізоляції. Для зовнішньої ізоляції характерна залежність електричної міцності від метеорологічних умов. Показники метеорологічних умов безперервно змінюються в часі, тому повітряні ізоляційні проміжки вибирають так, щоб вони мали необхідну електричну міцність і при таких несприятливих умовах. У нормальному стані неіонізовані гази є майже ідеальними діелектриками. Цей стан порушується при напруженості поля, при якій в газі під дією сил поля виникає інтенсивна

іонізація - газовий розряд. При газовому розряді різко зростає струм, що стікає з електродів. Цей струм є струмом конвекції, який обумовлений рухом заряджених часток між електродами.

Література

1. Костенко М.В., Богатенков И.М., Михайлов Ю.А., Халилов Ф.Х. Физика грозового розряда и защита линий электропередачи. – Л.: ЛПИ, 1982.
2. Kokkonen M. Development of Lightning Protection for Covered Conductor, ICCS, 2000.
3. Kuffel, E., Zaengl, W. S. High Voltage Engineering. Pergamon Press, Great Britain.
4. P. Chowdhuri, A.K. Mishara, P.M. Martin, “The effects of nonstandard lightning voltage waveshapes on the impulse strength of short air gaps,” IEEE Transactions on power delivery, Vol. 09, No. 4, pp.1991-1999, 1994.
5. S. Venkatesan, S. Usa, “Impulse Volt-Time Characteristics of Oil and OIP insulation,” American J. Appl. Sci., Vol. 2, No. 2, pp. 591-596, 2005.
6. William A. Chisholm John G. Anderson Lightning and Grounding EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above, Third Edition.

Summary

Lishchak I., senior teacher of ch.ESC
Binkevych T. 3-rd year student of ch. ESC
Lviv Politechnik National University

PHYSICAL PROCESSES IN THE BREAKDOWN OF AIR INSULATION

We consider the physical processes in the sample air insulation. It also examines the feasibility of using the dielectric properties of the air in the power plants of different voltage classes, as well as the advantages and disadvantages of air insulation in general.

Key words: *air insulation, breakdown, ionization, streamer, leader avalanche of electrons.*

Рецензент – д.т.н., професор Ціж Б.Р.