

АВТОМАТИЧНІ ВИМИКАЧІ ВИСОКОЇ НАПРУГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Слободян А.Р., студентка, Паненко О.М., асистент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електричних мереж та систем

Вступ. Автоматичні вимикачі HVDC (High-Voltage Direct Current) повністю відрізняються як від комутаційних пристроїв постійного струму, які експлуатуються протягом десятиліть, так і від автоматичних вимикачів змінного струму. Останнім часом мережі HVDC були відзначені своєю здатністю передати величезну кількість енергії. Однією з основних технологічних перешкод у реалізації мереж HVDC є фактична відсутність комерційно наявних вимикачів HVDC (наразі проходять лише фінальні випробовування обладнання у Китаї). Вимикачі HVDC - це великі, дорогі та технічно складні пристрої, які залежать від належної співпраці багатьох компонентів: механічних, силових, електричних.

Мета роботи. Проаналізувати особливості автоматичних вимикачів для HVDC та їх відмінність від аналогічних для змінного струму.

Матеріали дослідження. Аварійний струм, а отже, і його вимкнення в системах постійного струму відрізняється від аварійного змінного струму внаслідок наступного [1].

1. Для постійного струму не існує нульового значення струму. Це означає, що немає моменту, коли магнітна енергія $\frac{1}{2}Li^2$ дорівнює нулю (L - індуктивність системи). При вимкненні змінного струму, нульовий струм створює можливість для цього вимкнення. Вимкнення змінного струму має місце, коли в системі більше немає енергії. У постійному струмі, автоматичний вимикач постійного струму повинен поглинати енергію в несправній частині системи.

2. Остаточне значення аварійного струму в системах постійного струму обмежується лише опором (R) на шляху струму, тоді як в системах змінного струму індуктивність (L) провідників обмежує цей струм. В енергосистемах $R \ll \omega L$. Це означає, що за умови достатньої потужності джерела постійного струму, можуть виникнути дуже високі значення аварійного постійного струму. Отже, вимикачі постійного струму повинні діяти швидко, приблизно в 10 разів швидше, ніж вимикачі змінного струму, щоб здійснити вимкнення при прийнятному миттєвому струмі (15-25 кА в системах HVDC) [1]. Хоча цей струм значно нижчий від номінального струму розриву короткого замикання вимикачів змінного струму (до 63 кА), у постійному струмі потрібні набагато швидші дії, щоб обмежити пошкодження силових електронних компонентів перетворювача. Крім того, при швидкості зростання аварійного струму (di/dt) до кількох кА/мс [2] час роботи вимикача не може перевищувати декількох мілісекунд. Ця швидка реакція також вимагає необхідності дуже швидкого захисту від аварійного постійного струму [3]. На рис. 1 зображена схема для вимкнення постійного струму.

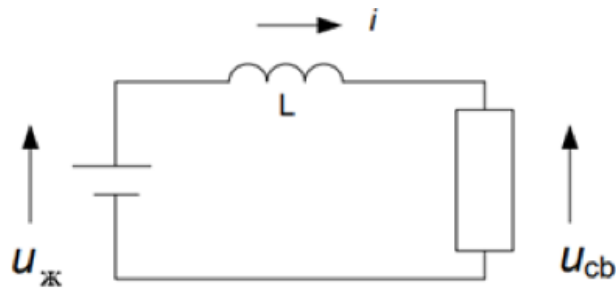


Рисунок 1 – Основна схема для вимкнення постійного струму

Основне рівняння схеми виглядає наступним чином:

$$U_{\text{ж}} = L \frac{di}{dt} + U_{\text{cb}} \rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (U_{\text{ж}} - U_{\text{cb}}) \quad (1)$$

де $U_{\text{ж}}$ - це напруга живлення, U_{cb} - напруга на вимикачі.

Це означає, що зменшення струму ($di/dt < 0$) може бути досягнуто лише тоді, коли напруга на вимикачі (зустрічна напруга) перевищує напругу системи: $U_{\text{cb}} > U_{\text{ж}}$.

Усі вимикачі постійного струму засновані на принципі: генерування зустрічної напруги, яка перевищує напругу системи протягом достатньо тривалого часу. Під час наявності зустрічної напруги, аварійний струм зменшується до нуля протягом часу зменшення струму несправності (ΔT_{fs}). Тому важливо не тільки генерувати зустрічну напругу, але й підтримувати її достатньо довго.

Вимикачі HVDC на основі комутації складаються з трьох паралельних гілок, рис. 2:

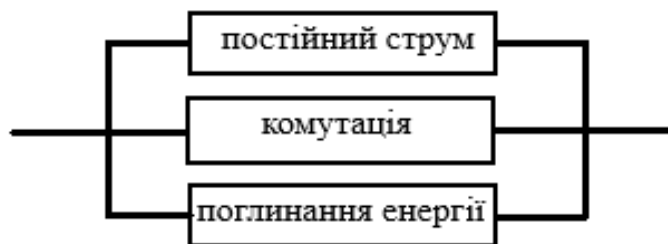


Рисунок 2 – Основна схема автоматичного вимикача HVDC

Коли вимикач постійного струму застосовується, розгортається така послідовність подій.

1. Спочатку струм переривається в гілці постійного струму (головній), силовою електронікою або механічним розподільним пристроєм з допоміжним ланцюгом для створення штучного нульового струму або їх комбінацією. У будь-якій конструкції присутні механічні розподільні пристрої для вимкнення або ізоляції. Це може бути вакуумний або SF₆-ізолюваний вимикач, але одна з ключових вимог полягає в тому, що він повинен працювати дуже швидко (кілька мілісекунд роз'єднання контактів) і тому відрізняється від розподільного пристрою змінного струму, який ніколи не досягає роз'єднання контактів на

першій наростаючій частині аварійного струму. Після того, як гілка постійного струму блокується для проходження струму, струм змушений комутувати в комутаційну гілку – паралельний шлях з високим опором, зазвичай ємністю. Струм заряджає конденсатор, за допомогою якого розвиватиметься швидко зростаюча напруга, що називається перехідною напругою переривання.

2. Підвищення напруги триватиме до тих пір, поки не буде досягнутий рівень захисту металооксидного варистора (МОВ) у третьому паралельному відділенні. З цього моменту по цій гілці починає текти струм. Оскільки напруга захисту МОВ ($U_{\text{МОВ}}$) вище напруги системи, тепер струм через МОВ буде неухильно знижуватися до нуля. Коли струм зменшується до (майже) нуля, дуже малий залишковий струм може бути вимкнений іншим вимикачем, і напруга системи знову з'явиться на відкритому вимикачі постійного струму. Варто зауважити, що напруга в системі відновлюється, як тільки зустрічна напруга буде повністю розвинена, обмежуючи вплив несправності на систему (час нейтралізації несправності). Після закінчення цього часу аварійний струм ще не усувається з системи, але її вплив компенсується тим, що МОВ тимчасово діє як джерело напруги системи[4].

Поточний процес вимкнення в системах постійного струму можна представити наступними параметрами:

- параметри системи: Номінальна напруга системи: $U_{\text{ж}}$, швидкість зростання струму несправності в місці вимикача, di/dt .
- параметр захисту: реле часу, $\Delta T_{\text{реле}}$.
- параметри автоматичного вимикача: пікове значення аварійного струму, яке потрібно перервати, $I_{\text{пікове}}$; комутація внутрішнього струму, $\Delta T_{\text{внс}}$, зустрічна напруга, створена та підтримувана МОВ, $U_{\text{МОВ}}$.

Можна виділити дві основні технології HVDC:

1. Інжекція активного струму, при якій перемикавання - створення нульового струму в гілці безперервного струму здійснюється серією високошвидкісних дугових вакуумних вимикачів та допоміжною схемою вприскування;

2. Гібридна технологія, де активне перемикавання здійснюється силовою електронікою, тоді як механічний перемикаючий елемент має функцію проведення безперервного струму та ізоляції силової електроніки у гілці безперервного струму.

Технологія гібридного перемикавання використовує поєднання механічних контактів та силової електроніки, але на відміну від наявної технології, контакти не дугові. Гілка безперервного струму складається з послідовного поєднання комутатора навантаження силової електроніки та надшвидкого механічного роз'єднувача.

Перемикач комутації навантаження це переважно послідовно-паралельне з'єднання IGBT для зменшення втрат та підвищення надійності. Оскільки безперервний струм проходить через цей вимикач, йому потрібно водяне охолодження. Швидкий роз'єднувач являє собою або ізольований вимикач SF₆ з одним зазором для повної перехідної напруги переривання [5], або послідовну комбінацію (до 12) вакуумних зазорів, кожен зі своїм надшвидким виконавчим механізмом [6]. В обох випадках вимикач відкривається лише після того, як

струм був перерваний перемикачем навантаження, щоб ізолювати його від напруги під час процесу перемикання.

Перемикач комутації навантаження може перервати повний аварійний струм у своїй гілці, оскільки комутаційна гілка була переключена в режим низького опору в момент виявлення несправності шляхом перемикання головного вимикача в провідність, тому на нього припадає лише дуже обмежена напруга.

На наступному етапі імпеданс комутаційної гілки змінюється з дуже низького на дуже високий. Це досягається за допомогою головного вимикача, сукупності великої кількості силових електронних компонентів.

Загалом, гібридні вимикачі HVDC мають більші втрати в режимі роботи, ніж технологія інжекції струму, і потребують активного охолодження через наявність силової електроніки у гілці безперервного струму.

У всіх автоматичних вимикачах HVDC використовуються механічні комутаційні пристрої надшвидкої дії. Ключовим компонентом у цьому є електромагнітні імпульсні приводи, так звані котушки Томсона, засновані на швидкому відштовхуванні котушок, електрично активованих розрядом конденсатора [7].

Висновки. Автоматичні вимикачі постійного струму принципово відрізняються від вимикачів змінного струму тим, як вони взаємодіють з енергосистемою. Вимикачі змінного струму призначені для роботи з номінальним струмом короткого замикання, що задається системою, за стандартних форм хвиль перехідної напруги відновлення. Вимикачі HVDC, навпаки, сильно взаємодіють із системою постійного струму: здатність вимкнення аварійного струму залежить від часу їх роботи, тоді як перехідна напруга переривання не залежить від системи, а від конструкції вимикача.

Дані технології ще проходять випробовування на практиці та здобувають належні сертифікати для введення у масове застосування. Але вже наявні результати з випробувань у Китаї свідчать про високу ефективність та перспективність застосування даної технології автоматичних вимикачів HVDC.

Перелік посилань

1. Пучер В. Основи переривання HVDC. *Electra*. 1968. № 5. С. 24-39.
2. Перемикання в системах електропередачі та розподілу / Смітс Р.П.П. та ін.; John Wiley & Sons, США, 2015. 440 с.
3. Летерм В., Ян І., Руффінг П., Шаріфабаді., Д. ван Гертем. Проектування для захисту від високої напруги постійного струму. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2019.
4. Смітс Р., Белда Н.А. Технологія переривання струму несправності HVDC. *ICEPE-ST*, 2019.
5. Хаффнер Дж., Якобсон Б. Гібридні вимикачі HVDC: ключова новація для надійних мереж HVDC. *CIGRE: симп. Болонья*, 2011. С. 264-272.
6. Танг Г. Розробка модульного каскадного гібридного вимикача напруги 500 кВ для застосування в електромережі постійного струму. *CIGRE: конф.*, 2018.
7. Біссаль А., Магнуссон Дж. Порівняння двох концепцій надшвидких приводів, *IEEE Trans. on Magnetics*. 2012. Вип. 48.