

International Ukraine-Poland Seminar

Power quality in distribution networks with distributed generation

Kiev, July 4-5, 2019

DOI: 10.32073/iepl.2019.23

**ЗНИЖЕННЯ ПЕРЕНАПРУГ ТА АПЕРІОДИЧНИХ СТРУМІВ ПРИ
ПІДКЛЮЧЕННІ ЛЕП 750 КВ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРИСТРОЇВ
КЕРОВАННОЇ КОМУТАЦІЇ**

Шполянський Олег

Інститут електродинаміки НАН України

Абстракт: В сучасних електричних мережах високої та надвисокої напруги набувають широкого застосування елегазові вимикачі (ЕВ). Часто вони обладнуються пристроями керованної комутації (ПКК), які дозволяють досить точно керувати моментом замикання і розмикання контактів вимикачів. Завдяки цьому з'являється можливість впливати на величини напруг і струмів та характер протікання перехідних процесів під час комутацій. В роботі проведено моделювання перехідних процесів при підключенні лінії електропередачі 750 кВ за допомогою ПКК. На основі результатів моделювання здійснюється вибір уставок ПКК, що забезпечать безаварійну експлуатацію елегазових вимикачів.

1. ВСТУП

В електричних мережах 110-750 кВ відбувається заміна повітряних і масляних вимикачів на елегазові вимикачі. Ця заміна обумовлена рядом чинників, серед яких зниження витрат на утримання масляних і компресорних господарств, відсутність запасних частин і можливості оновлення обладнання через припинення його випуску. Крім того, елегазові вимикачі, ізолюючим середовищем якого є елегаз (шестифториста сірка SF₆), мають певні технічні переваги: діелектрична міцність SF₆ приблизно в 2,5 рази вища, ніж у повітря; під час розпаду молекул SF₆ поглинається значна кількість тепла, питома теплоємність SF₆ в 3,7 рази більша, ніж у повітря; молекули SF₆ захоплюють вільні електрони, що ускладнює розвиток електронних лавин [1]. Однак, елегазові вимикачі не позбавлені недоліків. Електрична дуга, яка виникає між контактами ЕВ при його відключенні, згасає при проходженні миттєвого значення електричного струму через нуль. Тому, якщо в струмі частка аперіодичної складової перевищує припустиме значення, електрична дуга може не згаснути, а дугогасильна камера може бути зруйнована.

2. АНАЛІЗ АВАРІЇ ЕЛЕГАЗОВОГО ВИМИКАЧА НА ПІДСТАНЦІЇ 750 кВ «ПІВНІЧНОУКРАЇНСЬКА»

На повітряній лінії (ПЛ) 750 кВ довжиною 186,2 км «Північноукраїнська – Курська АЕС» 29.03.2014 р. підстанції (ПС) «Північноукраїнська» відбулось пошкодження елегазового вимикача 750 кВ типу LTV 800E4 (рис. 1) під час подавання напруги на не навантажену лінію. Шунтувальні реактори на ПС 750 кВ «Північноукраїнська» встановлені в кожній фазі ПЛ 750 кВ та постійно підімкнені через свої ЕВ до лінії. На момент подавання напруги вимикачі реакторів були увімкненні.

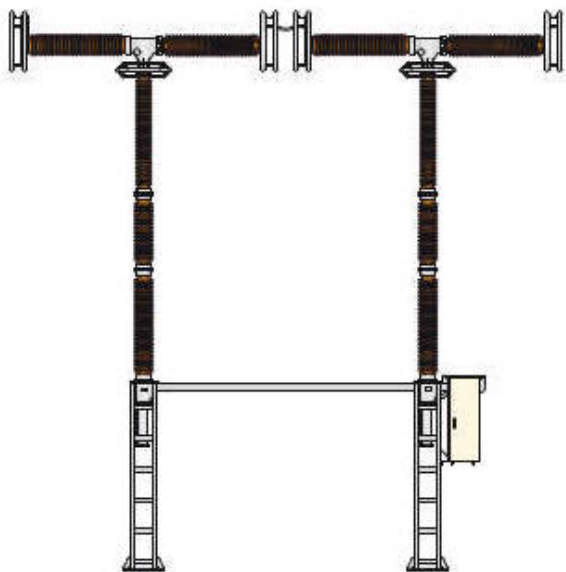


Рисунок 1. Елегазовий вимикач LTV 800E4

Увімкнення ЕВ 750 кВ відбувалось за допомогою пристрою керованої комутації SwitchSync f236. Затримки ввімкнення відносно нуля напруги фази «А» складали: 0 мс для фази «А», 6,7 мс для фази «В» і 13,3 мс для фази «С». Такі затримки було обрано з метою зменшення комутаційних перенапруг під час включення вимикача.

Аналіз подій і параметрів перехідного процесу, записаних регістратором «Регіна», показав, що фаза «С» була включена на не усунене коротке замикання (рис. 2в). Одночасно спрацювали на відключення приводи вимикачів фаз «А» та «В», але вимикачі не розірвали струм холостого ходу лінії, тому напруга та струм повітряної лінії існували в фазі «А» 28,23 секунди, а в фазі «В» - 28,44 секунди. Діюче значення струмів у фазах «А» та «В» в перший

момент часу (до відключення фази «С») складали приблизно 600 А (рис. 2 а, б) з

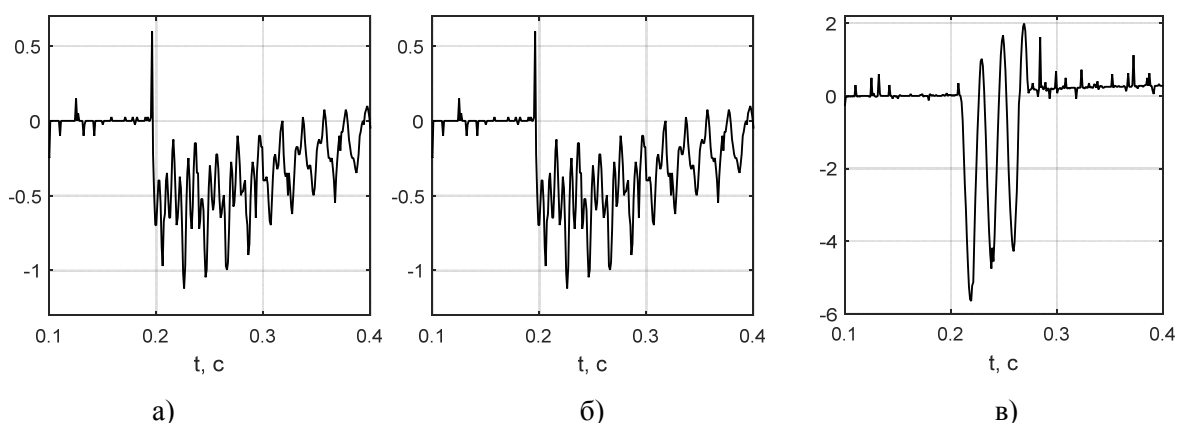


Рисунок 2. Миттєві струми в фазах ЕВ 750 кВ при включенні ПЛ на КЗ в фазі С, [кА].

великою долею аперіодичної складової (більш ніж 50 %), при цьому їх величина була нестабільна в розглянутих проміжках часу фіксації процесу та складала у середньому 200 А. Імпульси керування (включення та відключення) подавались майже одночасно. Після чого відбулось пошкодження фази «А» та «В» ЕВ 750 кВ. Воно проявилось у

розриві ізоляторів дугогасильних камер модулів В1 фази В, А1 і А2 фази А; сильного обгорання дугогасильного та основних контактів зруйнованих камер та сильного забруднення внутрішньої поверхонь ізоляторів продуктами розпаду елегазу і контактів (рис. 3).



Рисунок 3. Опорні ізолятори ЕВ 750 кВ LTV 800E4 без дугогасильних камер.

Оглядом вимикача було встановлено, що блок-контакти трьох фаз вимикача знаходились у положенні «відключено». Отже, команди на відключення вимикачів пройшли.

Було визначено [2], що струм в фазі «С» перестав протікати приблизно в 0,27 с. Повний час відімкнення ЕВ 750 кВ типу LTV 800E4 не перевищує 40 мс [3]. Тому можна сказати, що процес відімкнення вимикача почався приблизно в момент часу 0,23 с. Аперіодичні складові струмів фаз «А» і «В» на інтервалі часу 0,23-0,27 с складають приблизно 145-185 і 180-210 % відповідно. Це суттєво перевищує граничне значення аперіодичної складової струму для цього типу вимикачів, яке дорівнює 58% [3]. Дуга в фазах «А» і «В» продовжувала горіти після розходження контактів, що викликало тривалий вплив високих температур і тиску на елементи вимикача і призвело до руйнування полюсів фаз «А» і «В». В фазі «С» аперіодична складова струму в період часу 0,23-0,27 с складала приблизно

62,3-38,2 %, а після 0,25 с була менше 58 % (рис. 2в). Тому в фазі «С» елегазового вимикача гасіння дуги

відбулося.

Для моделювання перехідних процесів було використано пакет прикладних програм Matlab. ПЛЛ 750кВ «Північноукраїнська – Курська АЕС» була представлена блоком «Distributed Parameter Line» (лінія з розподіленими параметрами), шунтувальні реактори – індуктивностями. Робота пристрою керованої комутації SwitchSync F236 моделювалась за допомогою уведення відповідних затримок видачі команд на увімкнення/відімкнення вимикача після перетину кривою напруги фази «А» нуля. Вимикачі моделювались за допомогою блоку «Ideal Switch» (ідеальний вимикач). Коротке замикання (КЗ) на землю в фазі «С» моделювалось за допомогою блоку «Three-Phase Fault» (трифазне пошкодження) з опором КЗ 2 Ом, що в результаті моделювання давало струм і напругу в фазі «С» близькі до значень зафіксованих на ПС 750 кВ «Північноукраїнська». Моделювання перехідного процесу постановки ПЛЛ під напругу при наявності КЗ в фазі С показало адекватність моделі. Миттєві значення струмів та їх аперіодичні складові на інтервалі часу 0,24-0,27 с відповідали характеру

зміни струмів, який було зафіксовано підчас аварії. Аперіодичні складові склали приблизно 154-179,05 % в фазі «А», 141-165,27 % в фазі «В», 19,95-44,7% в фазі «С».

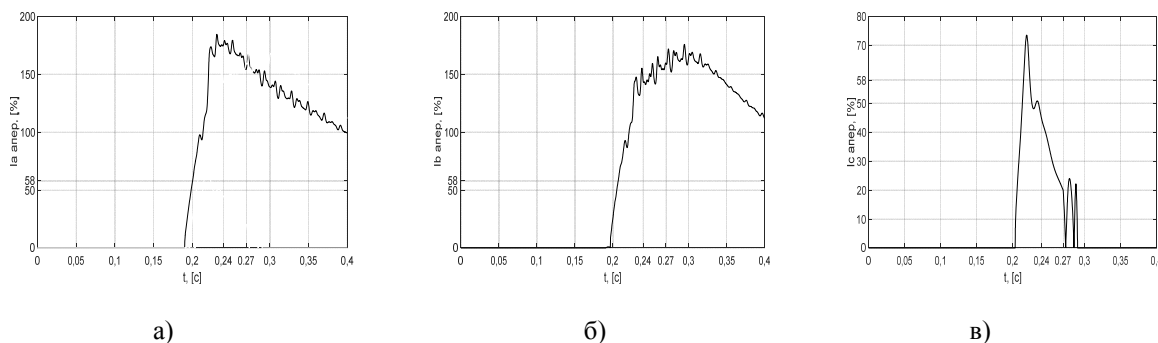


Рисунок 4. Результати моделювання аперіодичних струмів в фазах ЕВ 750 кВ при вклученні ПЛ на КЗ в фазі С, [кА].

Була проведена серія розрахунків за наявності або відсутності КЗ в фазі «С», ШР підключених з обох сторін ПЛ або тільки з однієї і подача напруги зі сторони ПС 750 кВ «Північноукраїнська» на ПЛ 750 кВ «Північноукраїнська – Курська АЕС» за уставками часу, що відповідають замиканню контактів вимикача підчас проходження миттєвого значення фазної напруги через нуль. Вони показали, що відключення ЕВ через аперіодичні струми, які перевищують допустимі 58% неможливе хоча б у двох фазах. Отже, ЕВ в цих умовах не можуть забезпечити вимогу стандарту, а саме реалізацію операції вклучення і подальше відключення без затримки часу (close-open).

3. ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ УСТАВКИ ЧАСУ ДЛЯ УВІМКНЕННЯ ЕВ

ПКК можуть бути налаштовані таким чином, щоб при вклученні ЕВ зменшувати рівні комутаційних перенапруг (замикання контактів вимикача відбувається при переході напруги через нуль) або аперіодичних складових комутаційних струмів (замикання контактів вимикача відбувається при максимальному значенні амплітуди напруги). Але в останньому випадку відбувається зростання комутаційних напруг. Замикання контактів вимикача при переході напруги через нуль застосовується, як правило при підключенні батарей конденсаторів або ємнісних фільтрів. Замикання контактів вимикача при переході струму через нуль - при підключенні реакторів і навантажених трансформаторів. Компенсовані ПЛ можна спрощено представити паралельним з'єднанням батареї конденсаторів і реактора. Тому можна припустити, що оптимальний момент замикання контактів ЕВ з точки зору зменшення аперіодичних струмів і перенапруг знаходиться в проміжку часу між проходженням миттєвих значень струму і напруги через нуль.

Як показав досвід експлуатації ЕВ, найбільш небезпечним для них є операція вклучення і подальше відключення без затримки часу. Підчас такої операції аперіодичні струми можуть не встигнути зменшитися до припустимих значень і ЕВ не зможе розірвати струм. Для визначення оптимального моменту замикання контактів ЕВ проведемо моделювання перехідних процесів на ПЛ 750 кВ «Північноукраїнська – Курська АЕС» з шунтувальними реакторами по кінцях лінії, реактивний опір яких 1876,8 Ом. Цей режим компенсації реактивної потужності є найбільш небезпечним з точки зору аперіодичних струмів. Явище корони та робота пристроїв обмеження перенапруг на враховувались. Вважалось, що припустимою часткою аперіодичного струму є 55%, а припустиме значення миттєвої напруги складає 815 кВ. Припустима тривалість цього перевищення напруги - 15 мс.

Постановка ПЛ під напругу проводилася з боку ПС «Північноукраїнська». Результати розрахунків наведено в таблицях 1, 2 і 3 для фаз А, В і С відповідно. Час включення 0,18 с ЕВ фазі А відповідає моменту переходу напруги через нуль,

Таблиця 1. Параметри перехідного процесу фази А

Момент включення, мс	Idc > 55%			Idc max, %	U > 815 kV			U max, kV
	T min	Tmax	dT		T min	Tmax	dT	
0,1800	0,18959	0,54285	0,35326	224,58	-	-	-	721,66
0,1805	0,18983	0,54101	0,35118	215,04	-	-	-	736,65
0,1810	0,19054	0,53042	0,33988	190,97	-	-	-	766,61
0,1815	0,1915	0,51267	0,32117	160,74	-	-	-	791,17
0,1820	0,19256	0,48687	0,29431	130,55	0,18531	0,18574	0,00043	825,99
0,1825	0,19773	0,45507	0,25734	103	0,18546	0,18652	0,00106	862,88
0,1830	0,20888	0,40848	0,1996	78,493	0,18581	0,18681	0,001	882,86
0,1835	0,22358	0,36272	0,13914	56,54	0,18625	0,18722	0,00097	885,13
0,1840	-	-	-	38,675	0,18676	0,19759	0,01083	869,09
0,1845	-	-	-	32,298	0,18735	0,18786	0,00051	835,17
0,1850	-	-	-	29,728	-	-	-	783,32

Таблиця 2. Параметри перехідного процесу фази В

Момент включення, мс	Idc > 55%			Idc max, %	U > 815 kV			U max, kV
	T min	Tmax	dT		T min	Tmax	dT	
0,1867	0,19646	0,57903	0,38257	206,44	-	-	-	763,64
0,1872	0,19689	0,57404	0,37715	197,17	-	-	-	793,04
0,1877	0,19778	0,56091	0,36313	180,35	0,19173	0,19241	0,00068	841,21
0,1882	0,19885	0,5402	0,34135	157,55	0,19157	0,19292	0,00135	882,23
0,1887	0,20392	0,51184	0,30792	132,68	0,19165	0,20331	0,01166	912,5
0,1892	0,20563	0,47423	0,2686	107,55	0,19195	0,20371	0,01176	936,93
0,1897	0,23654	0,4256	0,18906	83,012	0,19235	0,20373	0,01138	964,07
0,1902	0,26349	0,30515	0,04166	59,779	0,1928	0,20413	0,01133	972,31
0,1907	-	-	-	37,406	0,19329	0,19481	0,00152	960,43
0,1912	-	-	-	29,849	0,19382	0,19884	0,00502	928,41
0,1917	-	-	-	29,206	0,1944	0,20978	0,01538	905,7

Таблиця 3. Параметри перехідного процесу фази С

Момент включення, мс	Idc > 55%			Idc max, %	U > 815 kV			U max, kV
	T min	Tmax	dT		T min	Tmax	dT	
0,1933	0,20324	0,5451	0,34186	169,11	-	-	-	744,2
0,1938	0,20379	0,53904	0,33525	165,16	-	-	-	771,77
0,1943	0,20468	0,56091	0,35623	155,06	-	-	-	812,22
0,1948	0,20575	0,50684	0,30109	139,63	0,19821	0,20939	0,01118	845,3
0,1953	0,21123	0,47968	0,26845	120,75	0,19829	0,20989	0,0116	887,05
0,1958	0,24918	0,43939	0,19021	101,82	0,1986	0,21019	0,01159	922,39
0,1963	0,27062	0,39375	0,12313	82,091	0,19899	0,21053	0,01154	937,04
0,1968	0,29208	0,32158	0,0295	60,68	0,19945	0,21086	0,01141	938,61
0,1973	-	-	-	38,257	0,19995	0,21113	0,01118	920,19
0,1978	-	-	-	29,43	0,20051	0,20138	0,00087	881,59
0,1983	-	-	-	28,848	0,20121	0,23716	0,03595	859,99

а 0,185 с – переходу струму через нуль. В фазах В і С вони відповідно дорівнюють 0,1867 с і 0,1917 с та 0,1933 с і 0,1983 с. Також в таблицях зазначено моменти часу між якими відбувалось перевищення припустимих значень аперіодичного струму та напруги і тривалість цього перевищення, а також, максимальні значення струму і напруги.

Як ми бачимо з таблиць 1-3, в усіх фазах безпечно увімкнення ЕВ за критерієм величини аперіодичного струму наступає при затримці 40 мс відносно моменту переходу фазної напруги через нуль. Частка аперіодичного струму не перевищує 40%. Але максимальна напруга в усіх фазах перевищує припустимі 815 кВ. Причому в фазах А і С тривалість перенапруги складає приблизно 11 мс та наближується до уставки спрацювання захисту від перенапруг 15 мс. При затримці часу 45 мс величина аперіодичних струмів в фазі А складає приблизно 32,3%, в фазах В і С – менше 30%. Зменшуються і максимальні значення напруг. І хоча вони ще перевищують 815 кВ, але тривалість цього перевищення значно менша 15 мс. При затримці часу 50 мс величини аперіодичних струмів і максимальних напруг ще менше. В фазі А максимальна напруга взагалі становить 783,32 кВ, але в фазах В і С тривалість неприпустимої напруги перевищує уставку часу 15 мс, що може викликати відключення ПЛІ. Отже, можна зробити висновок, що оптимальною для включення ЕВ є затримка 45 мс.

4. ВИСНОВКИ

При визначенні уставок часу пристроїв керованої комутації елегазових вимикачів необхідно проводити моделювання перехідних процесів з метою узгодження величин і тривалостей неприпустимих аперіодичних струмів і напруг. Пріоритетним є забезпечення припустимого значення аперіодичного струму для реалізації ЕВ циклу включення-відключення. Обмеження перенапруг може бути здійснено іншими засобами, наприклад, застосуванням обмежувачів перенапруг.

5. ЛІТЕРАТУРА

1. Кох Д.: Свойства SF6 и его использование в коммутационном оборудовании среднего и высокого напряжения. Schneider Electric, Выпуск № 2, 2006, 24 С.
2. Кузнецов В.Г. Тугай Ю.І. Шполянський О.Г.: Аналіз передумов пошкодження елегазових вимикачів у електричних мережах 750 кВ // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2017. – Вип. 47. – С. 16–22.
3. Выключатели колонковые элегазовые — Справочник покупателя. АВВ, Издание 4, 2008-10. - 128 с.

Старший наук. спів. канд. техн. наук, Олег Шполянський

Інститут електродинаміки НАН України

Україна, 03057, проспект Перемоги, 56

e-mail: shpolianskyi@ied.org.ua.