

М.Л. БАРАНОВСЬКА, канд. техн. наук, доц., ДВНЗ “Криворізький національний університет”

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖ 6-10 кВ З ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ ПРИ ЗАМИКАННІ ФАЗИ НА ЗЕМЛЮ

Питання підвищення ефективності роботи розподільчих мереж 6-10 кВ з ізолюованою нейтраллю при замиканні фази на землю вирішене шляхом зниження рівнів перенапруг, які виникають при режимі ОЗЗ завдяки комплексному використанню засобів обмеження з уточненими параметрами.

Проблема та її зв'язок з практичними задачами. Важливим питанням для розподільчих мереж 6-10 кВ є необхідність зниження рівнів перенапруг при однофазних замиканнях на землю (ОЗЗ) за рахунок визначення раціональних засобів їх обмеження. При цьому виникає необхідність дослідження комплексного застосування різних методів, які пов'язані з використанням засобів обмеження перенапруг у розподільчих мережах: високоомних резисторів у нейтралі, міжфазних ємностей і нелінійних обмежувачів перенапруг (ОПН). Це дає можливість знизити ймовірність виходу з ладу силових кабелів, електрообладнання, зменшити витрати на виконання їхнього ремонту, скоротити простой технологічного устаткування та підвищити продуктивність підприємств.

Аналіз досліджень і публікацій. Аналіз математичних моделей розподільчих мереж і результатів досліджень показує, що опір кола замикання на землю R змінюється в межах до 200 Ом і впливає на перехідні процеси при ОЗЗ; у математичних моделях при дослідженні перехідних процесів за ОЗЗ опір поздовжніх віток і провідності ізоляції неушкоджених фаз можна не враховувати, тому що рівень перенапруг у колі за їх врахування зменшується на величину не більше 1 % [3]; при дослідженні процесу відновлення напруги на uszkodженій фазі встановлено, що опір ізоляції не відновлюється до первісного рівня і його необхідно приймати у математичних моделях за величиною таким, при якому за час півперіоду промислової частоти згасання амплітуди аперіодичної складової складе 0,95 [1,3]; для аналізу перехідних процесів при ОЗЗ у живильних мережах можна використовувати спрощену трифазну схему заміщення з урахуванням опору кола замикання на землю.

Постановка задачі. Питання підвищення ефективності роботи розподільчих мереж 6-10 кВ з ізолюованою нейтраллю при замиканні фази на землю вирішене шляхом зниження рівнів перенапруг, які виникають при режимі ОЗЗ завдяки комплексному використанню засобів обмеження з уточненими параметрами.

Викладення матеріалу і результати. Для дослідження перехідних процесів у розподільчих мережах прийнята спрощена схема заміщення [1].

Залежно від величини опору R_* перехідні процеси можуть протікати з одним або декількома високочастотними переходами струму ОЗЗ через нуль за час півперіоду мережі ($T_c/2$). Існують такі \tilde{R}_* , які є межами між одним і двома високочастотними переходами струму ОЗЗ через нуль.

Важливими параметрами до моменту переходу струму ОЗЗ через нуль є: t_i – час горіння дуги; k_δ – коефіцієнт згасання періодичної складової, $k_\delta = e^{\delta t_i}$; $i'_i = di/dt$ – швидкість зміни струму при переході через нуль; t_m – момент часу, в який напруга в неушкоджених фазах приймає максимальне значення. Час переходу струму ОЗЗ через нуль t_i визначено з рівняння (1):

$$\varphi_\infty \sin(\omega t + \psi) + A_1 e^{pt} + A_2 e^{\delta t} \sin(\omega_k t + \nu) = 0. \quad (1)$$

Значення i'_i визначено з рівняння (2):

$$i'_i = \frac{1}{R} [\varphi_\infty \omega \cos(\omega t_i + \psi) + p A_1 e^{pt_i} + \delta A_2 e^{\delta t_i} \sin(\omega_k t_i + \nu) + \omega_k A_2 e^{\delta t_i} \cos(\omega_k t_i + \nu)]. \quad (2)$$

Значення амплітуд A_1, A_2 залежать від R_* , і їх визначаємо з [2].

Розглянуто вплив міжфазної ємності на величину перенапруг при ОЗЗ за схемою заміщення (рис. 2).

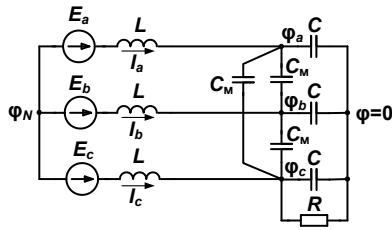


Рис. 2. Схема заміщення розподільчої мережі з урахуванням міжфазної ємності

Характеристичне рівняння системи має вигляд

$$p^3 + \frac{(1+k)}{(1+3k)} \frac{1}{R_*} p^2 + \frac{1}{(1+3k)} p + \frac{1}{(1+3k)} \frac{1}{3R_*} = 0, \quad (3)$$

де $k=C_m=C$.

З аналізу розрахунків випливає, що міжфазна ємність сприяє зниженню частоти високочастотних коливань ω_{k*} за будь-яких значень R_* , зменшенню ступеня згасання періодичної складової δ_* . Величина p_* , що характеризує ступінь згасання аперіодичної складової, зменшується лише за малих значень R_* . Кратності перенапруг у випереджальній фазі без врахування міжфазної ємності складають: при горінні дуги 3,94-3,86, при відновленні – 4,25-4,09 (рис. 3).

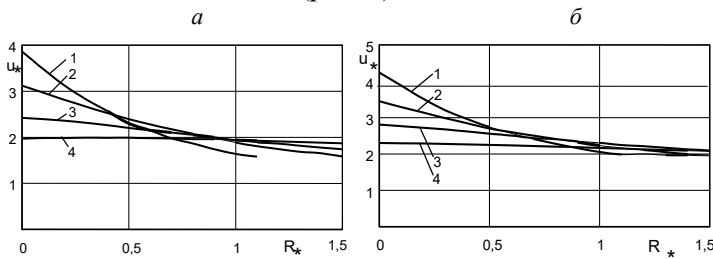


Рис. 3. Графіки розрахункових рівнів перенапруг $u^*=f(R_*)$, $f_0=2250$ Гц: а - горіння дуги; б - відновлення напруги; 1 - $C_m=0$; 2 - $C_m=C/3$; 3 - $C_m=C$; 4 - $C_m=C$

При значенні міжфазної ємності $C_m=C/3$ рівні перенапруг складають: при горінні дуги (2,98-2,85) $U_{фт}$; при відновленні – (3,44-3,11) $U_{фт}$, тобто рівень перенапруг

зменшується десь на 20%. При $C_m=C$ перенапруги знижуються на 38% (напруга при горінні дуги дорівнює (2,52-2,42) $U_{фт}$, а при відновленні – (2,81-2,49) $U_{фт}$). Подальше збільшення міжфазної ємності не спричиняє суттєвого зниження перенапруг. Тому для більш глибокого обмеження рівнів перенапруг доцільно використовувати інші заходи, щоб уникнути використання великих значень додаткових ємностей [2,5].

Одним з таких заходів є увімкнення активного опору R_{N*} у нейтраль розподільчої мережі. Дослідження перенапруг при включенні допоміжних міжфазних ємностей та активного опору в нейтралі мережі проводилися за допомогою схеми заміщення, наведеної на рис. 4.

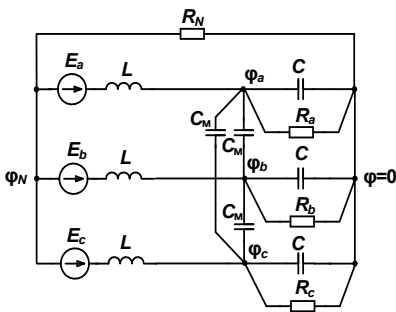


Рис. 4. Схема заміщення розподільчої мережі з увімкненням у нейтраль активного опору

У процесі горіння дуги вільні складові потенціалів фаз і нейтралі змінюються за законом

$$\varphi_{ce}(t) = A_1 e^{p_1 \omega_o t} + A_2 e^{p_2 \omega_o t} + A_3 e^{-\delta_1 \omega_o t} \sin(\omega_{k1} \omega_o t + v_1), \quad (4)$$

а в процесі відновлення напруги на ушкодженій фазі після гасіння дуги за законом

$$\varphi_{ce}(t) = A_{1v} e^{p_{3v} \omega_o t} + A_{2v} e^{p_{4v} \omega_o t} + 2A_{3v} e^{-\delta_{1v} \omega_o t} \sin(\omega_{1v} \omega_o t + v_v). \quad (5)$$

Для одержання активної складової струму ОЗЗ визначеної величини необхідно в нейтраль включати активний опір, величина якого залежить від частоти власних коливань розподільчої мережі.

При малих опорах кола замикання на землю ($R_* \leq 1/3\sqrt{3}$) опір у нейтралі, що створює активну складову струму ОЗЗ $I_{a*} = I_a / I_c$, визначено за виразом

$$R_{N*} \approx \frac{f_o}{3f_c I_{a*}} = \frac{\omega_o}{3\omega_c I_{a*}} = \frac{k_\omega}{3I_{a*}}, \quad (6)$$

де f_c – частота мережі; f_o – частота власних коливань; ω_c, ω_o – відповідно колові частоти; $k_\omega = \omega_o / \omega_c$.

У нейтраль необхідно включати опір такої величини, за якого активна складова струму не перевищує 0,5-0,6 ємнісної. У розподільчих мережах, у яких міжфазна ємність утворюється природним чином і складає одну третину від фазної, заходів для обмеження перенапруг до рівня $3,1 U_{фт}$ не потрібно.

Для обмеження перенапруг до рівня $2,7U_{фm}$ досить активної складової струму $I_{a*}=0,5$; обмежити перенапруги до рівня $1,8 U_{фm}$ неможливо (значення буде настільки малим, що мережа матиме властивості мережі з глухо заземленою нейтраллю) [4].

Схема заміщення розподільчої мережі з ОПН показана на рис. 5.

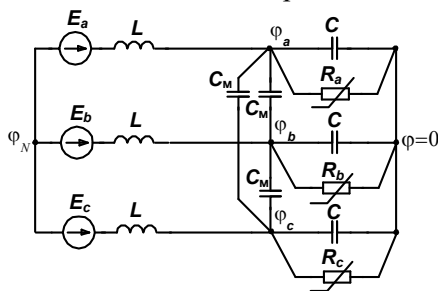


Рис. 5. Схема заміщення розподільчої мережі з ОПН

Визначальними навантажувальними впливами на ОПН є струмові навантаження й енергія, виділена на них за час існування ОЗЗ.

Нелінійний характер вольтамперної характеристики (ВАХ) ОПН приводить до безперервної зміни параметрів розрахункової моделі. Для рішення нелінійних диференціальних рівнянь використано метод послідовних інтервалів, при реалізації якого постійні в межах малого відрізка часу

активні опори фаз коригувалися на кожному кроці ітераційного процесу відповідно до ВАХ ОПН. При розрахунках використано ВАХ окисно-цинкових резисторів.

ОПН незалежно від обраного захисного рівня обмежують рівні перенапруг як у процесі горіння дуги, так і в процесі відновлення напруги на ушкодженій фазі.

На рис. 6 наведено залежності напруг у випереджальній фазі за два цикли горіння дуги і два цикли відновлення напруги. За мінімальних опорів кола замикання на землю виконано розрахунки навантажень на обмежувачі для мереж з різними частотами власних коливань (рис. 7) [6].

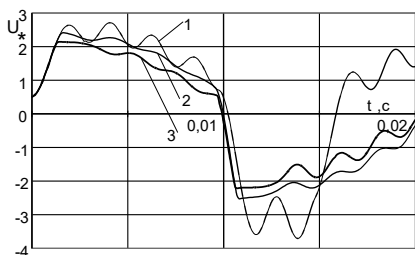


Рис. 6. Графік зміни перенапруг у випереджальній фазі $U=f(t)$ ($L=0,05$ Гн; $C=2,5$ мкФ; $R_*=0,1$; $=0$; $U_{фm}=5208$ В): 1 - без ОПН; 2,3 - з ОПН, залишкова напруга при струмі 100 А: 2 - 13,8 кВ, 3 - 12 кВ

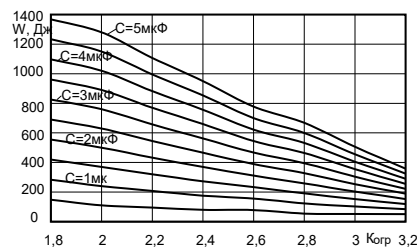


Рис. 7. Графіки залежностей максимальних значень енергії, виділеної в обмежувачах за час $T_c/2$ від рівня обмеження перенапруг ($U_{фm}=5134$ В; $R_*=0,05$)

Максимальні значення енергії, виділеної в обмежувачах при повторному циклі горіння-відновлення

$$W = C(540 - 145K_{opr}), \quad (7)$$

де C - ємність фази на землю, мкФ; K_{opr} - обраний рівень обмеження перенапруг.

Висновки і напрямлення подальших досліджень. 1. Доведено, що міжфазна ємність C_m обмежує перенапруги при ОЗЗ тільки до рівня $(3,1-2,7) U_{фm}$ за малих опорів кола замикання на землю (у межах $R_*=0,5$ (біля 70 Ом)) і величині C_m , що перевищує ємність фази не більше ніж у 3 рази. Подальше збільшення C_m не знижує рівні перенапруг, а лише збільшує час перехідного процесу й енергію, виділену в місці ушкодження.

2. За результатами виконаних досліджень перенапруг у розподільчих мережах при ОЗЗ встановлено, що введення в коло нейтралі високоомного резистора R_N опором 900-2800 Ом, за якого $I_{a*}=0,5I_c$, дозволяє знизити їх рівні в ушкодженій і неушкодженій фазах до $2,7U_{фm}$.

3.Визначено, що обмежити перенапруги в розподільчих мережах до необхідних рівнів можливо із застосуванням нелінійних обмежувачів перенапруг (ОПН), які спрацьовують при горінні дуги в неушкоджених фазах, а в процесі відновлення напруги - в ушкодженій фазі.

4.Установлено, що навантажувальні впливи на ОПН (струми та енергія, виділена на них за час існування ОЗЗ) зростають за повторних запалювань дуги, малих опорах кола замикання на

землю і зі зменшенням коефіцієнта обмеження. За $k_{opr} = 1,8$ і різних значеннях параметрів мережі за час півперіоду напруги мережі $T_c/2$ виділяється енергія $W=690-2100$ Дж.

Список літератури

1. Толмачов С.Т., Барановська М.Л. Моделирование процессов дуговых замыканий на землю в сетях с изолированной нейтраллю // Вісник ВПШ. - 1997. - №4. - С. 36-40.
2. Барановская М.Л. Влияние междуфазной емкости на частоту и затухание переходных процессов при однофазных замыканиях на землю // Разработка рудных месторождений. - Кривой Рог. - 1998. - №65 - С. 30-34.
3. Барановская М.Л. Моделирование переходных процессов в распределительной сети при замыканиях на землю с учетом активных проводимостей изоляции // Книга за матеріалами п'ятої міжнар. конф. "Контроль і управління в технічних системах" (КУТС-97). - Том 3. - Вінниця: "УНІВЕРСУМ-Вінниця". - 1999. - С. 21-26.
4. Барановская М.Л. Влияние высокоомного резистора в нейтрали на дуговые перенапряжения в распределительных сетях // Разработка рудных месторождений. - Кривой Рог. - 2000. - №72. - С. 72-78.
5. Сінолиций А.П., Барановська М.Л. Вплив міжфазної ємності на процес відновлення напруги на пошкодженій фазі в кар'єрних розподільчих мережах // Научные труды КГПИ "Проблемы создания новых машин и технологий". - Выпуск 1. - Кременчуг: Научно-исследовательская часть КГПИ. - 2001. - С. 297-299.
6. Барановская М.Л. Рациональные методы ограничения перегрузок по напряжению карьерного электрооборудования при однофазных замыканиях на землю в питающих цепях. // Научно-технический сборник. Разработка рудных месторождений. 85выпуск. Криворожский технический университет. - Кривой Рог. -2004. - С. 99-102.

Рукопис продано до редакції 19.03.12
УДК 622.625.28-83

О.Н. СИНЧУК, д-р техн. наук, проф., Э.С. ГУЗОВ, И.О. СИНЧУК, кандидаты техн. наук, доц.,
А.В. ОМЕЛЬЧЕНКО, ассистент, ГВУЗ «Криворожский национальный университет»
Д.А. ШОКАРЕВ, ст. преподаватель, Е.И. СКАПА, аспирант
Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского

К ВОПРОСУ СТРАТЕГИИ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО И БЕЗОПАСНОГО В ЭКСПЛУАТАЦИИ ДВУХОСНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА ДЛЯ РУДНЫХ ШАХТ

В статье приведены результаты исследований по поиску и созданию энергоэффективного и безопасного в эксплуатации электровоза для рудных шахт – контактно-аккумуляторного. Приведен разработанный закон и алгоритм управления тяговым электротехническим комплексом, его структура для данного вида электровоза.

Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями. На отечественных предприятиях горно-металлургического комплекса с технологиями подземной добычи полезных ископаемых (шахты, рудники) эксплуатируется около 3,5 тысяч - двадцати типов двоосных контактных и аккумуляторных электровозов [1]. Около 80 % данного электровозного парка составляют аккумуляторные виды и 20 % - контактные.

Последние используются на всех рудных шахтах и частично, в ряде случаев, регламентированных соответствующими правилами [2], на угольных. Контактные электровозы за более чем столетний опыт эксплуатации в подземных выработках показали свою непривередливость в обслуживании и эксплуатации, а главное, при прочих равных факторах то, что они значительно дешевле своих прототипов - аккумуляторных, которые ко всему имеют недостаточный для рудных шахт сцепной вес и требуют дополнительно специальных дорогостоящих аккумуляторов и стационарных зарядных станций.

Вместе с тем, контактные электровозы в силу наличия контактного провода (КП) как элемента тяговой сети в условиях подземных выработок являются причиной поражения горнорабочих электрическим током при их несанкционированном, но весьма вероятном по технологии ведения горных работ прикосновении к нему.

Только в 2011 г. на шахтах (рудниках) Криворожского железорудного бассейна произошло несколько несчастных случаев поражения горнорабочих электрическим током при касании КП, в т.ч. со смертельным исходом. Парадоксально, но возникают, хотя и наивные по своей сути, но все же предложения замены электровозной откатки в шахтах Кривбасса на альтернативные - другие виды. Такая постановка задачи обеспечения безопасности - это явное непонимание состояния вопроса, но важно и безусловно то, что проблему безопасности людей в шахтах от касания КП необходимо решать.