

Рис. 1. Залежність питомої ємності водозбірника $v_{вод}$ головного водовідливу від коефіцієнта нерівномірності його гілок K_{nz} за об'ємом для їх кількості n_z : 1 – 5; 2 – 4; 3 – 3; 4 – 2

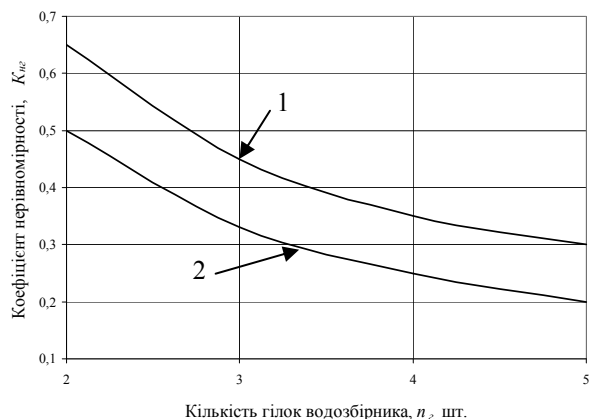


Рис. 2. Залежність коефіцієнта нерівномірності об'єму гілок водозбірника від їх кількості: 2 – мінімальне значення при рівності гілок; 1 – максимальне значення при максимально можливій нерівності гілок

Висновки. Ефективне регулювання режимів електроспоживання головним водовідливом вугільної шахти із застосуванням диференційованого за періодами доби тарифу на електроенергію забезпечується наявністю водозбірників, ємність яких визначається годинним припливом води, більшим за час проходження одного максимуму навантаження в енергосистемі, можливим замуленням водозбірника, кількістю його гілок та розподілом їх ємностей з використанням коефіцієнта нерівномірності.

Зменшення ємності водозбірника забезпечується збільшенням кількості його гілок та одночасним зниженням нерівномірності їх місткості, а також співставлення значень із п-1. Достатній час заповнення водозбірника для ефективного регулювання режимів електроспоживання визначається розрахунковим шляхом та складає від 6 до 8 годин, що менше за величину, наведену в ПТЕ, у 1,5-2 рази.

Список літератури

1. Разумный Ю.Т., Герасимович В.Н., Мочков В.С. Эффективность потребителей-регуляторов электрической нагрузки на шахтах // Уголь Украины. – 1988. – № 9. – С. 16-17.
2. Мочков В.С., Разумный Ю.Т. Оптимальное количество ветвей водосборника главного водоотлива шахты // Уголь Украины. – 1989. – № 3. – С. 33-34.
3. Наннес Ю.В., Недолужко В.Н., Федор С.А. О требованиях по шахтному водоотливу новых ПТЭ и подготавливаемых ПБ // Уголь Украины. – 2008. – № 5. – С. 15-17.
4. Правила технічної експлуатації вугільних шахт. – К.: Мінвуглепром України, 2006. – 354 с.

Рекомендовано до публікації д.т.н. С.І. Випанасенком 25.11.09

УДК 622.478:621.316.925

© Ф.П. Шкрабец, А.И. Ковалев, 2010

Ф.П. Шкрабец, А.И. Ковалев

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА НЕЙТРАЛИ НА ВНУТРЕННИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Наведена оцінка впливу режиму заземлення нейтралі розподільних мереж напругою 6-10 кВ на кратність внутрішніх перенапружень та експлуатаційні показники систем електропостачання, а також на умови електробезпеки в сталому і перехідному режимах замикання фази на землю, запропоновано шляхи оптимізації режиму роботи нейтралі розподільних мереж.

Представлена оценка влияния режима заземления нейтрали распределительных сетей напряжением 6-10 кВ на кратность внутренних перенапряжений и эксплуатационные показатели систем электроснабжения, а также на условия электробезопасности в установившемся и переходном режимах замыкания фазы на землю, предложены пути оптимизации режима работы нейтрали распределительных сетей.

The influence estimation of neutral ground mode of distributive networks with voltage 6-10 kV on the internal over-voltage ratio and operating indexes of power supply systems, and also on the terms of electrical safety in the steady state and transient modes of phase ground short circuit is presented, the ways of neutral operating mode optimization of distributive networks are offered.

В общем случае оценка эффективности и выбор режима работы нейтрали распределительных и питающих сетей осуществляются на основе технико-экономического сравнения вариантов. При этом определяющими критериями оценки режимов нейтрали следует считать: надежность электроснабжения, электробезопасность, обеспеченность защитой от однофазных замыканий на землю и качество ее работы; экономичность системы. Одним из наиболее важных критериев оценки систем электроснабжения в целом, и режима нейтрали в частности, следует считать надежность. Исследуем по этому критерию системы электроснабжения с различными режимами работы нейтрали электрических сетей.

1. *Сети с полностью изолированной нейтралью.* Распределительные сети напряжением выше 1000 В с полностью изолированной нейтралью получили преимущественное распространение в большинстве стран. Однако такой режим нейтрали сети не всегда является оптимальным с точки зрения указанных ранее критериев.

При прочих равных условиях надежность электроснабжения электроприемников или надежность распределительных сетей в основном определяется повреждаемостью элементов сети и качеством работы устройств релейной защиты. Степень влияния указанных факторов на надежность работы распределительных сетей зависит от режима нейтрали, который в свою очередь определяет уровень внутренних перенапряжений и характер переходных процессов при однофазных замыканиях на землю. Уровень перенапряжений оказывает определяющее влияние на повреждаемость электрических сетей и их элементов, а характер переходных процессов – на качество работы устройств защиты от замыканий на землю.

Наибольший уровень напряжения между неповрежденными фазами и землей на основании теории Петерса и Слепяна определяется выражением [1, 2]

$$U_{пер} = \frac{3}{2} U \phi \frac{\frac{3}{2} + \frac{C(1-d)}{C+C_M}}{\frac{3}{2} - \frac{C(1-d)}{C+C_M} (1-a)}, \quad (1)$$

где C_M – суммарная междуфазная емкость электрически связанной сети; $(1 - a)$ – коэффициент, учитывающий уменьшение удержанных зарядов за счет активной проводимости и в сетях с изолированной нейтралью, может принимать значения от 0,85 до 0,95; $(1 - d)$ – коэффициент, учитывающий затухание амплитуды собственных колебаний, связан с потерями в колебательной цепи при замыкании на землю, в общем случае определяется формулой

$$(1-d) = e^{-1/(4rCf_c)},$$

где r – переходное сопротивление в точке замыкания, f_c – частота свободных колебаний переходного процесса.

С учетом возможных изменений понижающих коэффициентов, для реальных параметров распределительных сетей максимальное значение напряжения между здоровыми фазами и землей находится на уровне 4,5-фазного напряжения. Для этих же сетей теоретический максимум напряжения смещения нейтрали составляет трехкратное фазное напряжение.

Однофазные замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью сопровождаются переходными процессами, возникающими в момент появления замыкания и в момент отключения поврежденного участка (процесс восстановления напряжения в сети) [3]. Отмеченные переходные процессы обеспечивают значительную часть ложных срабатываний устройств защиты от замыканий на землю в сетях с полностью изолированной нейтралью.

Системы электроснабжения с полностью изолированной нейтралью по сравнению с сетями с другими режимами нейтрали не требуют дополнительных капитальных затрат. Однако эксплуатационные расходы в сетях с полностью изолированной нейтралью за счет большей повреждаемости, а также за счет ущерба от перерывов электроснабжения значительно больше, чем в сетях, работающих с другими режимами нейтрали.

Следует также отметить, что можно в некоторой степени снизить эксплуатационные расходы и ущерб от перерывов за счет применения оборудования и электрических сетей с более высоким уровнем изоляции, что, естественно, требует дополнительных капитальных вложений.

2. *Сети с компенсированной нейтралью.* Компенсация емкостного тока однофазного замыкания на землю в электрических сетях применяется при превышении значения емкостного тока однофазного замыкания на землю в установленном режиме сверх допустимого нормативными документами.

Эффективность компенсации емкостных токов и эффективность работы электрических сетей с компенсированной нейтралью в значительной степени зависит от режима настройки компенсирующего устройства. Большинство исследователей при этом отдают предпочтение резонансной настройке индуктивности компенсирующего устройства с емкостью сети относительно земли, то есть

$$X_L = X_C \text{ или } \omega L_k = \frac{1}{3\omega C}, \quad (2)$$

где X_L и X_C – соответственно индуктивное сопротивление компенсирующего устройства и емкостное сопротивление всей электрически связанной сети относительно земли; L_k – индуктивность компенсирующего устройства; C – емкость одной фазы всей электрически связанной сети относительно земли.

Условие (2) в установленном режиме однофазного замыкания на землю обеспечивает равенство по значению емкостной I_C и индуктивной I_L составляющих токов замыкания на землю и, учитывая их

направление, остаточный ток замыкания становится равным активной составляющей тока замыкания I_a (без учета гармонических составляющих тока замыкания). В случае несоблюдения условия (2) остаточный ток определяется как геометрическая сумма активной и реактивной составляющих. Реактивная составляющая в свою очередь зависит от степени расстройки (отклонения от резонансной настройки) компенсации:

$$v = \frac{I_L - I_C}{I_L} = 1 - 3\omega^2 CL_k = 1 - K,$$

где $K = \frac{I_C}{I_L} = 3\omega^2 CL$ – коэффициент (степень) настройки компенсирующего устройства.

Кроме резонансного режима настройки компенсирующего устройства, различают также режим недокомпенсации (остаточный реактивный ток замыкания на землю носит емкостной характер) и перекомпенсации (остаточный реактивный ток замыкания на землю носит индуктивный характер).

Если оценивать надежность электроснабжения электроприемников повреждаемостью элементов сети и качеством работы релейной защиты, то необходимо отметить, что в основном применение компенсированных сетей, где требуется действие защиты на отключение, сдерживается вторым условием. Что касается повреждаемости элементов распределительных сетей, то следует указать на непосредственную связь этого показателя с режимом настройки компенсирующего устройства, так как именно настройкой компенсирующего устройства определяется уровень перенапряжений в сети при однофазных замыканиях на землю.

$U_{пер}/U_{ф}$

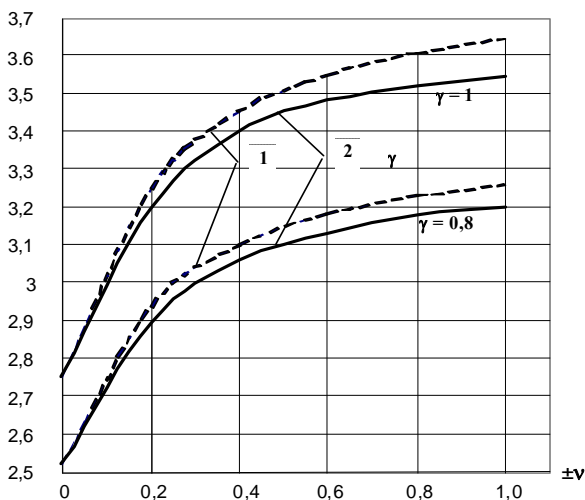


Рис. 1. Зависимости максимальной кратности перенапряжений от степени расстройки компенсации в режиме: 1 – перекомпенсации; 2 – недокомпенсации

На рис. 1 показаны кривые зависимости максимальной кратности перенапряжений от степени расстройки компенсации [4]. Значение коэффициента, γ , учитывающего снижающие перенапряжения факторы, в общем случае зависит от частоты колебаний свободных составляющих тока замыкания, длин линий распределительной сети, расположения места повреждения относительно источника, сопротивления в цепи замыкания и с достаточной для практического применения точностью может быть определено по выражению:

$$\gamma = \frac{U_{пер} - U_{кон}}{U_{нач}},$$

где $U_{кон}$ – мгновенное значение напряжения на поврежденной фазе, установившееся непосредственно после замыкания на землю; $U_{нач}$ – значение напряжения на неповрежденной фазе в момент замыкания.

Для реальных параметров распределительных сетей указанный коэффициент находится на уровне 0,8...0,9.

Из рис. 1 видно, что при резонансной настройке компенсирующего устройства, а также при его расстройке в пределах 5%, даже теоретически перенапряжения на неповрежденных фазах не могут превысить $2,75 U_{ф}$. Снижение уровня перенапряжений обусловлено созданием удобного пути для стоков статических зарядов по фазам за счет включения в нейтраль сети дугогасящего реактора. Увеличение степени расстройки компенсации от 5 до 30...40% приводит к быстрому нарастанию уровня перенапряжений. Необходимо отметить, что при расстройке компенсирующего устройства на 20...25% от резонансной эффективности компенсирующих устройств в части ограничения перенапряжений при замыканиях на землю практически не ощущается по сравнению с сетями с полностью изолированной нейтралью.

Перенапряжение в нейтрали сети, примерно в 1,5...2 раза меньше кратности перенапряжений на неповрежденных фазах, что также способствует снижению повреждаемости элементов системы электроснабжения с резонансным режимом компенсации.

Одним из факторов, оказывающих влияние на выбор режима настройки дугогасящих реакторов является возможность нарушения нормальной работы сети за счет резонансных явлений в компенсированных сетях. В реальных распределительных сетях наблюдается постоянная или временная несимметрия изоляции фаз сети относительно земли. В результате, при нормальной работе сети напряжение нейтрали системы относительно земли отличается от нуля (напряжение несимметрии). Максимальное напряжение смещения нейтрали U_{OC} в компенсированных сетях в соответствии с [5] в режиме резонансной настройки от емкостной несимметрии изоляции может быть определено из соотношения суммарного емкостного тока замыкания на землю I_C и активной составляющей остаточного тока I_a :

$$\dot{U}_{oc} = U_n I_c / I_a \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что для уменьшения напряжения смещения нейтрали следует принимать меры, приводящие к уменьшению напряжения несимметрии или увеличению остаточного активного тока замыкания.

На рис. 2 показаны кривые изменения напряжения смещения нейтрали от степени расстройки компенсирующего устройства плунжерного типа (кривая 1) и дугогасящего реактора с подмагничиванием (кривая 2). Максимальное значение напряжения смещения следует учитывать при выборе напряжения срабатывания первой и второй ступеней защиты сигнализации от замыкания на землю.

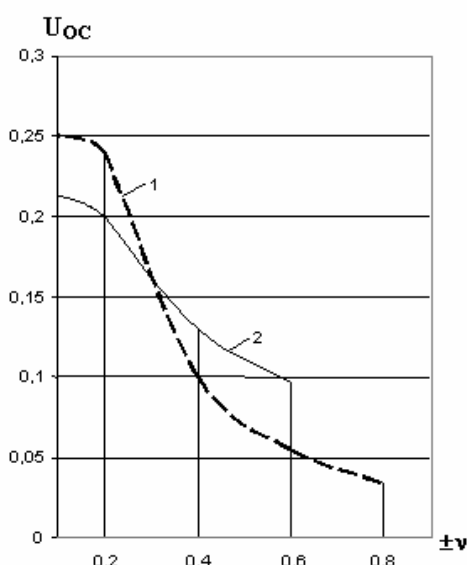


Рис. 2. Зависимость напряжения смещения нейтрали от степени расстройки дугогасящего реактора: 1 – плунжерного типа; 2 – с подмагничиванием

С экономической точки зрения распределительные сети с компенсацией емкостного тока замыкания на землю требуют дополнительных капитальных затрат на дугогасящие реакторы и устройства для их подключения. Что касается эксплуатационных расходов, то они значительно меньше, чем в сетях с полностью изолированной нейтралью за счет меньшей повреждаемости элементов системы. При резонансной настройке компенсирующего устройства и при незначительных расстройках компенсации в электрических сетях запасы электрической прочности изоляции по отношению к воздействию перенапряжения увеличиваются до 30% [4, 6].

Необходимо заметить, что эффективность компенсации емкостных токов замыкания на землю наблюдается при резонансном и близких к нему режимах настройки компенсирующих устройств. Учитывая возможное изменение параметров распределительных сетей (оперативные и аварийные переключения, наращивание ЛЭП и т.п.), необходимо ориен-

тироваться на применение устройств автоматической настройки режима дугогасящих реакторов.

3. *Сети с активным сопротивлением в нейтрали.* Основной причиной ложных срабатываний защит (сигнализаций) от замыканий на землю в сетях с полностью изолированной и компенсированной нейтралью следует считать возникновение в сети после отключения поврежденного присоединения (или после самоликвидации повреждения) колебательного процесса с частотой близкой к частоте 50 Гц [3].

Естественно, что для устранения ложных срабатываний устройств защиты от замыканий на землю, вызванных указанными колебаниями, необходимо исключить или резко сократить длительность переходных процессов. Одним из эффективных методов устранения колебания является уменьшение добротности колебательного контура, что достигается уменьшением значения активного сопротивления изоляции сети относительно земли, которое включено параллельно реактивным сопротивлением изоляции [5]. В результате появляется активная составляющая тока, которая накладывается на электрическую сеть и увеличивает активную составляющую тока однофазного замыкания на землю. Эффективность метода подавления переходного процесса существенно проявляется при значении создаваемого активного тока замыкания на землю на уровне не менее 40% от емкостного, то есть

$$I_a = (0,4 - 1,0) I_c .$$

Электрические сети с резистором в нейтрали обладают, по сравнению с сетями с полностью изолированной или компенсированной нейтралью, более высокой надежностью за счет улучшения качества работы устройств защиты от однофазных замыканий на землю, исключения феррорезонансных процессов и уменьшения повреждаемости элементов системы электроснабжения. Последнее обусловлено значительным снижением уровня внутренних перенапряжений, сопровождающих однофазные замыкания на землю.

Величина перенапряжений в трехфазной сети с активным сопротивлением в нейтрали определяется выражением [3, 6]

$$U_{nep} = \sqrt{3} U_{\phi} \sin(\varphi_3 + 30^\circ) + U_{\phi} \left[\sin \varphi_3 - (\sin \varphi_{e.m.} - 0,2) e^{-ka(\varphi_3 - \varphi_{e.m.})} \right] \frac{C(1-d)}{C + C_M}, \quad (4)$$

где φ_3 – фаза напряжения поврежденной фазы в момент зажигания, рад.; $\varphi_{e.m.}$ – фаза напряжения поврежденной фазы в момент гашения дуги, при которой напряжение смещения достигает максимума.

На рис. 3 показана зависимость максимальной кратности внутренних перенапряжений в сети с резистором в нейтрали от соотношения активной и емкостной составляющих тока однофазного замыкания на

землю, полученная с учетом самых неблагоприятных условий по выражению (4). По мере роста активной составляющей тока замыкания по отношению к емкостной, кратность перенапряжений уменьшается до значения 2,4, при равенстве активного и емкостного токов замыкания. Из рисунка видно, что дальнейшее увеличение активной составляющей практически не приводит к существенному уменьшению кратности перенапряжений.

Сравнительно ощутимые дополнительные капитальные затраты на выполнение сетей с резистором в нейтрали по сравнению с полностью изолированной нейтралью сети будут при токах замыкания на землю более 10 А. В этом случае требуется включение в нейтраль сети высоковольтного резистора и устройств для его подключения, в состав которых кроме коммутационных аппаратов могут входить специальные трансформаторы, необходимые для подключения резисторов. В сетях с током замыкания на землю до 5 А дополнительные капитальные затраты уменьшаются практически до нуля, так как в этом случае представляется возможным обойтись имеющимися в сети измерительными трансформаторами НТМИ и низковольтными резисторами.

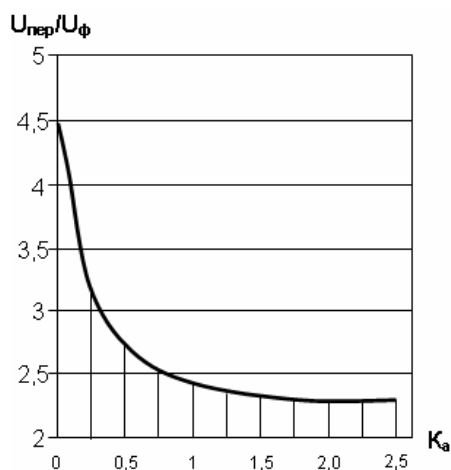


Рис. 3. Зависимость максимальной кратности перенапряжений в сети с резистором в нейтрали от отношения активной и емкостной составляющих тока замыкания K_a

За счет снижения повреждаемости элементов сети и улучшения качества работы устройств защиты от однофазных замыканий на землю значительно уменьшаются и эксплуатационные расходы.

Следует отметить, что наиболее высокая эксплуатационная надежность обеспечивается в распределительных сетях с наложением дополнительной активной составляющей на ток замыкания на землю (сети с резистором в нейтрали). В таких сетях при определенных условиях резко ограничиваются уровни внутренних перенапряжений, сопровождающих несимметричные повреждения, практически исключается развитие феррорезонансных процессов, что соответственно способствует уменьше-

нию повреждаемости элементов сети. Кроме того, при этом практически исключается ложная работа устройств защиты от замыканий на землю за счет резкого подавления (практически устранения) переходных процессов при появлении и отключении повреждений.

По условиям обеспечения электробезопасности высоковольтных электрических сетей при непосредственном прикосновении человека к токоведущим частям ни один из возможных режимов нейтрали нельзя признать благоприятным. Независимо от режима нейтрали с учетом реальных параметров изоляции относительно земли распределительных сетей и времени действия устройств защиты, а также времени действия применяемой в таких сетях коммутационной аппаратуры, значения тока, проходящие через тело человека будут значительно превышать безопасные уровни.

Следует однако отметить, что степень косвенной опасности электрической сети, например от действия напряжения прикосновения (при прикосновении человека к корпусам электрооборудования и машин, оказавшимся под напряжением вследствие повреждения изоляции одной из фаз), в значительной степени зависит от режима нейтрали. Для установившегося режима однофазного замыкания в этом случае предпочтение следует отдавать электрическим сетям с компенсированной нейтралью при резонансной (или близкой к резонансной) настройке компенсирующего устройства [7]. Если учитывать переходные процессы, сопровождающие металлические и дуговые однофазные замыкания на землю, то наиболее благоприятным следует считать электрическую сеть с активным резистором в нейтрали.

Одной из важных составляющих комплекса электроснабжения, влияющих на показатели надежности и электробезопасности, является наличие и качество работы устройств защиты от несимметричных повреждений, особенно для сетей с передвижными электроустановками. С точки зрения обеспеченности защитой от однофазных замыканий на землю, а также качества ее работы (что непосредственно связано с электробезопасностью и бесперебойностью питания электроприемников) наиболее благоприятными можно считать электрические сети с резистором в нейтрали. В таких сетях, при правильном выборе значения резистора, устройства токовой и направленной защит нулевой последовательности, применяемые в сетях с изолированной нейтралью, показывают более надежную и качественную работу за счет подавления переходных процессов.

В самом неблагоприятном положении по условию обеспеченности защитой от однофазных замыканий на землю находятся электрические сети с компенсированной нейтралью. Установлено, что характер изменения аварийных токов и параметров нулевой последовательности от режима настройки компенсирующего устройства практически исключает возможность применения в таких сетях устройств, реагирующих на параметры установившегося аварийного режима.

С точки зрения капитальных вложений наиболее экономичными можно считать электрические сети с полностью изолированной нейтралью. Однако, если учитывать ущерб от перерывов в питании электроприемников из-за развития аварии, то предпочтение следует отдать также сетям с резистором в нейтрали, в которых последствия от переходных и феррорезонансных процессов минимизированы.

На основании изложенного, а также с учетом того, что в электрических сетях напряжением 6-35 кВ системы электроснабжения большинства промышленных предприятий при превышении токами замыкания на землю допустимых значений, установлены дугогасящие реакторы не оборудованные устройствами автоматической настройки индуктивности в резонанс с емкостью сети, кроме того, зачастую эксплуатационная динамика указанных сетей может превышать 20-процентное изменение параметров изоляции сетей относительно земли, предлагается для указанных сетей использовать комбинированный режим работы нейтрали.

Суть комбинированного режима заземления нейтрали состоит в том, что кроме создания индуктивной составляющей тока однофазного замыкания на землю, предлагается также одновременно накладывать на ток замыкания и активную составляющую [2]. То есть, комбинированный режим заземления нейтрали, это компенсированная сеть с наложением в аварийном режиме дополнительной активной составляющей (рис. 4). Значение накладываемой на сеть активной составляющей тока замыкания на землю должно быть на уровне 30-50% от емкостной составляющей.

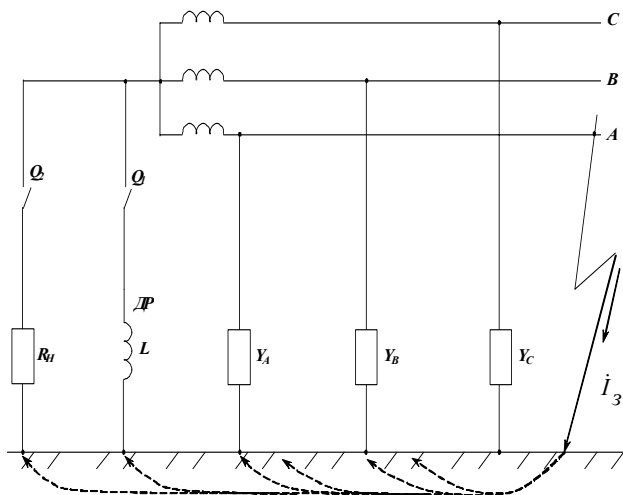


Рис. 4. Схема, поясняющая комбинированный режим заземления нейтрали

Такой режим обеспечивает подавление переходных процессов, улучшение работоспособности устройств защиты от замыканий на землю, исключает феррорезонансные явления, чем и достигается повышение уровня электробезопасности и надежности и обеспечиваются эксплуатационные показате-

ли, адекватные сетям с резистором в нейтрали даже при расстройках дугогасящего реактора до 50%.

На рис. 5 для сравнения показаны зоны максимальной кратности перенапряжений от степени расстройки компенсации от резонансного режима в сети с компенсированной нейтралью (зона 1) и в сети с комбинированным режимом работы нейтрали (зона 2). Верхняя и нижняя границы зон соответствуют значениям коэффициента γ , равном соответственно 1 и 0,8, который учитывает физические характеристики сети, относительное место повреждения и другие существенные моменты.

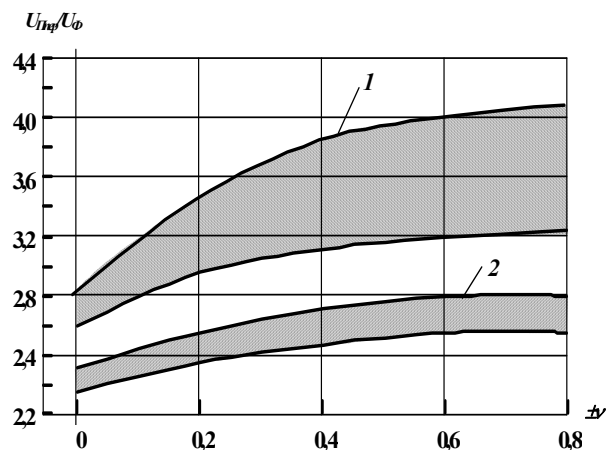


Рис. 5. Зависимость кратности перенапряжений от степени расстройки реактора при компенсированном (1) и комбинированном (2) режимах заземления нейтрали

Список литературы

1. Вильгейм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах. – М.; – Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 415 с.
2. Шкрабец Ф.П., Баласмех Ф.К., Скосырев В.Г. Комбинированный режим работы нейтрали распределительных сетей напряжением 6-35 кВ // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2000. – Вип. 65. – С. 46-51.
3. Пивняк Г.Г., Шкрабец Ф.П. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров: Справочное пособие. – М.: Недра, 1993. – 192 с.
4. Лихачев Ф.В. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1972. – 151 с.
5. Микрюков В.И. Устранение ложных отключений линий защитами от замыканий на землю в распределительных сетях разрезом и карьеров // Промышленная энергетика. – 1981. – № 9. – С. 41-43.
6. Перенапряжения в сетях 6-35 кВ / Ф.А. Гиндуллин, Г.Г. Гольштейн, А.А. Дульзон, Ф.Х. Халилов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
7. Режимы нейтрали электрических сетей / И.М. Сирина, С.Н. Кисленко, А.М. Михайлов. – К.: Наук. думка, 1985. – 264 с.

Рекомендовано до публікації д.т.н. Ю.Т. Разумним 28.08.09