

Авторы:
 к.т.н. Козлов В.Н.,
 д.т.н. Булычев А.В.,
 к.т.н. Соловьев И.В.,
 ООО «НПП Бреслер»,
 г. Чебоксары, Россия.
 Александров А.С.,
 ПАО «Россети Волга»,
 г. Саратов, Россия.

Ph.D. Kozlov V.N.,
 D.Sc. Bulichev A.V.,
 Ph.D. Solovyev I.V.,
 «NPP Bresler» LLC,
 Cheboksary, Russia.
 Alexandrov A.S.
 PJSC «Rosseti Volga»,
 Saratov, Russia.

Ключевые слова: особенности сетей с компенсацией емкостного тока, перенапряжения, несимметрия, смещение нейтрали, остаточный ток замыкания на землю, компенсация полного тока.

Abstract: the features of medium voltage networks with capacitive current compensation are given. The reason for the resonant displacement of the neutral is described and the effect of compensation on the magnitude of overvoltage is shown. Low compensation efficiency in networks with high ground fault currents is shown. Methods for solving related compensation problems are presented.

Keywords: features of networks with compensation for capacitive current, overvoltage, unbalance, residual earth fault current, full current compensation.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ЭФФЕКТЫ КОМПЕНСАЦИИ ТОКОВ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

EFFECTS GO WITH SINGLE-PHASE EARTH FAULT COMPENSATION

Аннотация: приведены особенности сетей среднего напряжения с компенсацией емкостного тока. Описана причина резонансного смещения нейтрали и показано влияние компенсации на величину перенапряжений. Показана низкая эффективность компенсации в сетях с большими токами замыкания на землю. Приведены способы решения сопутствующих компенсации проблем.

Сети с изолированной нейтралью

Распределительные сети среднего напряжения 6-35 кВ относятся к классу сетей с изолированной нейтралью. Достоинством этого класса сетей является возможность сохранения в работе поврежденного участка при возникновении наиболее частого вида повреждения – однофазного замыкания на землю (ОЗЗ). Питающий трансформатор этих сетей, как правило, имеет обмотки, соединенные в треугольник. Линейные напряжения треугольника не зависят от потенциала нейтрали сети и, соответственно, потребитель не чувствует ОЗЗ. Токи в месте замыкания на землю в установившемся режиме малы, и сеть может продолжать работать, сохраняется нормальное электропитание потребителей.

Токи ОЗЗ и необходимость их компенсации

Относительно земли фазы сети представляют собой распределенную емкость (рис. 1). В момент возникновения ОЗЗ эта емкость разряжается через точку замыкания и разрядный ток I_3 значительно превышает ток установившегося режима. В результате в месте ОЗЗ возможно возникновение дуги, что чревато тяжелыми последствиями.

Замыкание с устойчиво горящей или прерывистой дугой наиболее опасный вид ОЗЗ. Устойчивая дуга – гарантированный пожар,

прерывистая – опасность перенапряжений и многоместных пробоев кабелей в сети.

Даже если дуги не возникло и замыкание сразу стало металлическим, необходимость компенсации токов ОЗЗ диктуется такими основными факторами, как электробезопасность, пожаробезопасность, повышенный конструктивный износ оборудования, перенапряжения при ОЗЗ и пробой изоляции кабелей.

С точки зрения электробезопасности недопустимо протекание токов ОЗЗ по земле, потому что это чревато попаданием людей под шаговое напряжение. Особенно остро эта проблема стоит в карьерных и шахтных сетях. Защите от ОЗЗ в этих сетях приходится действовать на отключение поврежденного участка.

Пожаробезопасность связана главным образом с возможностью загорания дуги в месте ОЗЗ. Даже если ОЗЗ металлическое, происходит разогрев места замыкания, и оно может перейти в дуговое. Особенно это опасно для кабельных линий, так как пожар в кабельных каналах приводит к большому аварийному ущербу.

Протекание токов утечки на землю по деревянным опорам и металлическим элементам линий: экранам и броне кабелей, арматуре железобетонных опор, телу металлических опор – ведет к их ускоренному износу и разрушению.



Козлов

Владимир Николаевич

Год рождения: 1952.

В 1975 г. окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова, кафедра «Электрические аппараты». В 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию в Ленинградском политехническом институте на тему «Комплексная защита судовых генераторов».

Главный конструктор ООО «НПП Бреслер», доцент.



Булычев

Александр Витальевич

Год рождения: 1956.

В 1980 г. окончил Вологодский политехнический институт по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства», инженер-электрик. В 1984 г. окончил аспирантуру и защитил кандидатскую диссертацию по разработке и исследованию отдельных узлов комплексной (микроэлектронной) системы защиты турбогенераторов. В 1998 г. окончил докторантuru и защитил докторскую диссертацию на тему «Совершенствование защиты блоков генератор-трансформатор и электродвигателей».

Технический директор ООО «НПП Бреслер», профессор.

Прерывистый характер дуги обычно связывают с перенапряжениями, возникающими в моменты ее загорания и погасания. Режимов работы сети и причин, при которых такие перенапряжения возникают, достаточно много. Например, известно, что проблемы возникают при отключении линий с маленькими индуктивными токами, линий, находящихся в режиме холостого хода или слабо загруженных [1]. Сети с такими линиями склонны к феррорезонансу, что сильно усложняет их эксплуатацию.

Общепринято, что при токах ОЗЗ более 5А дуга имеет устойчивый характер, при меньших токах – прерывистый. Однако имеется много зафиксированных случаев, свидетельствующих, что дуга может быть устойчивой и при токах значительно менее 5А.

Эти процессы достаточно хорошо изучены, и многих перенапряжений можно не допустить путем грамотного проектирования и эксплуатации сетей [2].

Нормативные требования по компенсации токов ОЗЗ

С момента проектирования и строительства следует понимать, что рано или поздно, с развитием этой сети, возникнет необходимость компенсации тока ОЗЗ. Поэтому, в преддверии этого, Правила технической эксплуатации (ПТЭ) [3] обязывают периодически измерять емкостные токи сети и готовиться к их компенсации.

Величины токов, при достижении которых компенсация обязательна, в ПТЭ определены как:

- 30А при напряжении сети 3-6 кВ.
- 20А при напряжении сети 10 кВ.
- 15А при напряжении сети 15-20 кВ.
- 10А при напряжении сети 3-20 кВ, имеющей железобетонные и металлические опоры на воздушных ЛЭП и во всех сетях напряжением 35 кВ.
- 5А в схемах генераторного напряжения 6-20 кВ блоков генератор-трансформатор.

Компенсация токов ОЗЗ

Токи, о которых идет речь, протекая по земле, так или иначе должны вернуться к ис-

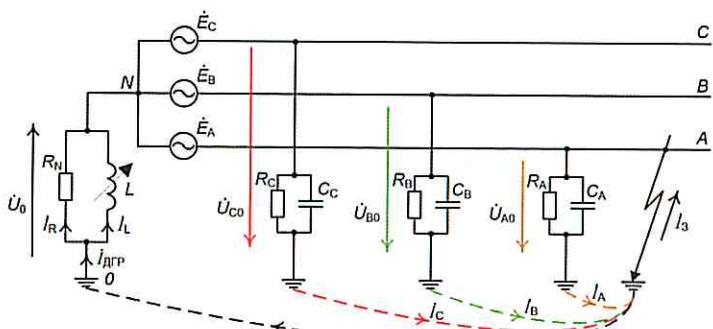


Рис. 1. Схема замещения сети с компенсацией емкостных токов

точнику питания сети, образуя следующий контур: фаза питающего источника (генератор или трансформатор) – линия сети – емкость линии и потребителя (нагрузки) относительно земли – земля – емкость нейтрального вывода источника относительно земли. Этот контур обычно называют контуром нулевой последовательности (КНП) сети.

В нормальном режиме работы сети напряжение между нейтралью источника и землей в идеале отсутствует и токи в КНП не протекают. При возникновении ОЗЗ нейтраль сети смещается в сторону замкнувшей фазы. Возникает так называемое напряжение смещения нейтрали U_0 (рис. 1) и, соответственно, ток ОЗЗ, с которым связаны все основные проблемы.

Предложение по компенсации токов ОЗЗ появилось практически сразу после осознания проблемы. Петерсон [2] предложил заземлить нейтраль источника через катушку индуктивности (рис. 1). В этом случае суммарный ток в КНП складывается из емкостного тока ОЗЗ (I_C) и индуктивного тока катушки Петерсона (I_L). Выбрав ток I_L равным току I_C , суммарный ток можно свести практически к нулю. Для катушки обычно используют названия: катушка Петерсона, дугогасящая катушка, дугогасящий реактор.

Качество компенсации оценивается величиной v – называемой расстройкой компенсации и определяемой как:

$$v = \frac{I_C - I_L}{I_C} \cdot 100\%, \quad (1)$$

при: $I_C = I_L$ – расстройка $v=0$, соответственно: $I_C > I_L$ – недокомпенсация $v>0$; $I_C < I_L$ – перекомпенсация $v<0$.

Непосредственно пользоваться данной формулой не представляется возможным.



Соловьев

Игорь Валерьевич

Дата рождения: 21.10.1984 г.

В 2007 г. окончил ЧГУ им.

И.Н. Ульянова, кафедра

«Вычислительная техника».

В 2018 г. в ЧГУ им.

И.Н. Ульянова защитил

кандидатскую диссертацию на тему «Совершенствование управления компенсацией емкостных токов замыкания на землю в распределительных электрических сетях».

Начальник отдела режимов нейтрали
ООО «НПП Бреслер».

Александров

Александр Сергеевич

Дата рождения: 25.07.1983 г.

В 2005 г. окончил Саратовский государственный технический университет.

Заместитель начальника отдела инновационного и научно-технического развития

ПАО «Россети Волга».

Если из измеренного тока дугогасящей катушки можно выделить его реактивную составляющую тока I_L , то измерить ток I_C из-за неопределенности места замыкания невозможно. Кроме того, не весь ток катушки протекает через точку замыкания.

В реальной жизни сеть постоянно «дышит» – подключаются/отключаются линии, изменяются их параметры за счет подключения/отключения нагрузок и т. д. Соответственно от замера к замеру расстройка изменяется вслед за сетью. В требованиях к настройке компенсации [4] регламентируется погрешность обеспечения требуемого тока дугогасящим реактором (ДГР) не более 1%. Очевидно, что проверить эту точность можно лишь в лабораторных условиях.

Ранее применяемые дугогасящие катушки для изменения расстройки имели ступенчатое переключение витком. При этом изменение расстройки, соответствующее переключению витков на одну ступень, составляло 3-20% в зависимости от соотношения токов и производителя.

Современные дугогасящие катушки обеспечивают плавное изменение индуктивности и используются совместно с автоматикой управления. Применительно к ним прижилось название ДГР. В эксплуатации, чтобы не «дергать» лишний раз ДГР, приходится задавать гистерезис на перенастройку реактора при изменении расстройки порядка $\pm 5\%$.

Обычно неточность компенсации связывают с перенапряжениями при ОЗЗ. Но во многих работах [5, 8] имеются кривые, характеризующие зависимость перенапряжения от величины расстройки, из которых видно, что расстройка порядка $\pm 5\%$ на перенапряжение практически не влияет (рис. 2). В этих же работах допускается расстройка компенсации до $\pm 10\%$.

Таким образом, в компенсированных сетях, даже в случае наличия самых неблагоприятных факторов, величина перенапряжений не превышает $2,75U_{\Phi}$ [7].

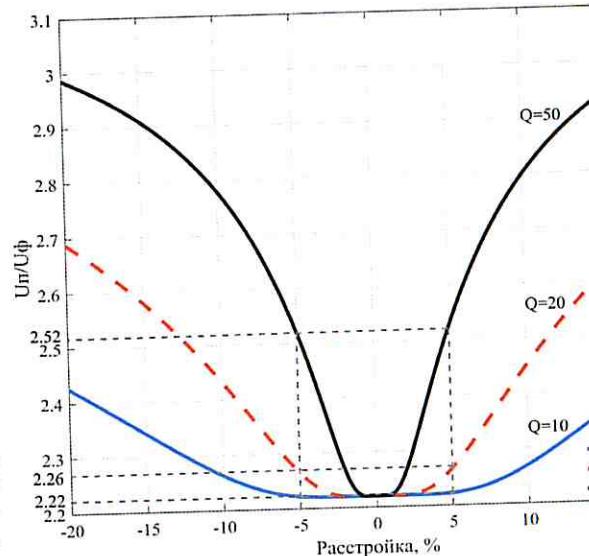


Рис. 2. Зависимость кратности перенапряжений от расстройки компенсации и добротности [8]

Эффекты компенсации емкостных токов

Поскольку компенсация емкостных токов при развитии сети неизбежна, необходимо знать о связанных с ней эффектах.

Резонансное смещение нейтральной сети разность потенциалов землей и нейтральной точкой се- деляемой как центр тяжести трех линейных напряжений, называет- жением на нейтрали сети U_o и дол- равнно нулю. Добиться абсолютно рии фаз сети относительно земли чески нереально. Поэтому в се- присутствует некоторое напряже- симметрии U_{HC} , величина кото- рой не только от параметров сети, добротности Q и степени расстр- пенсации емкостного тока (рис. 3). Технически все эти величины связаны [7]:

$$U_o = \frac{U_{HC}}{\sqrt{v^2 + d^2}} = \frac{U_{HC}Q}{\sqrt{v^2 Q^2 + 1}}$$

где $d=1/Q=(I_R/I_C)\cdot 100\%$ называет- ся коэффициентом успокоения сети и про- собой величину обратную доброте Q .

Максимум кривой $U_o=f(v)$ час- зуется для «ручной» или автог

настройки ДГР в резонанс ($v=0$). Автоматика, использующая подобный способ настройки, обычно называется автоматикой резонансного типа [9].

При $v=0$ согласно (2) $U_o = U_{nc} \cdot Q$. Средняя добротность компенсированной сети $Q=20$ ($d=0.05$) [5]. Поэтому в ПУЭ указывается, что перед установкой устройств компенсации величина несимметрии сети не должна превышать 0,75% фазного напряжения U_Φ . При стандартном измерительном трансформаторе напряжения это соответствует $U_o=0,75 \cdot 20=15$ (В).

В свою очередь, это значение U_o соответствует минимально устанавливаемой уставке реле напряжения, фиксирующего факт ОЗЗ.

В качестве способов симметрирования сети в ПУЭ предлагается изменить емкость фаз относительно земли путем транспозиции проводов, распределением конденсаторов ВЧ связи по фазам, установкой дополнительных конденсаторов между фазами и землей. Все мероприятия достаточно проблематичны и редко где выполняются. Также предлагается использовать специальные устройства «ручного» или автоматического симметрирования сетей [10].

Явление увеличения напряжения U_o в компенсированной сети при настройке ДГР соответствующей $v=0$ называется резонансным смещением нейтрали. Если это приводит к срабатыванию защиты от ОЗЗ, режим называется – ложная земля в сети.

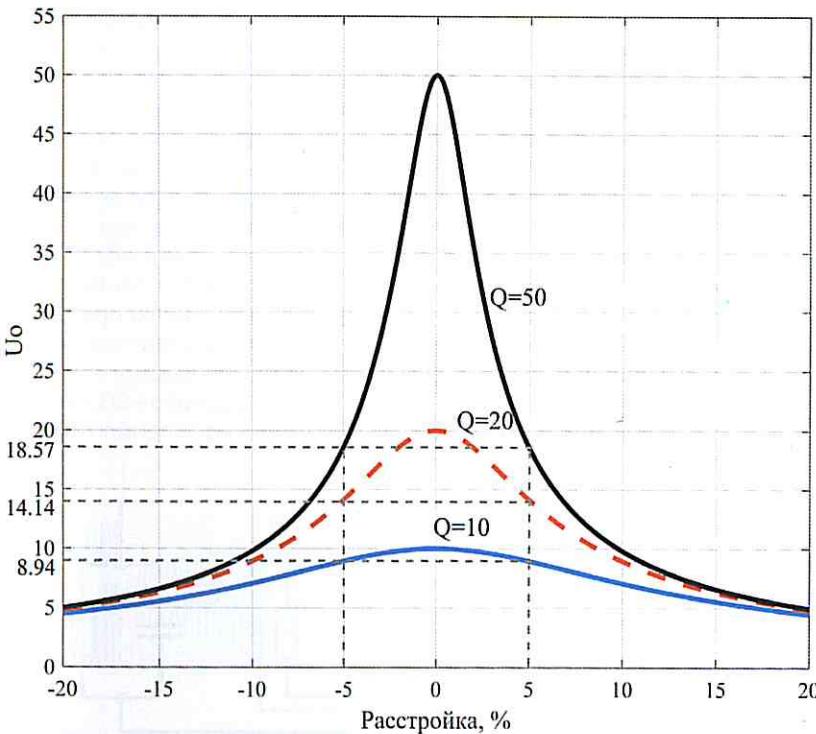


Рис. 3. Зависимости напряжения на нейтрали от расстройки компенсации и добротности

Добротность современных ДГР составляет 40 и более. Современные кабели из сшитого полиэтилена и применяемое оборудование потребителей имеют значительно меньшие утечки на землю. Все это ведет к тому, что общая добротность современной компенсированной сети существенно более 20. Поэтому режим «ложная земля в сети» фиксируется все чаще, особенно в сетях с малым количеством фидеров.

Существуют различные способы уменьшения напряжения на нейтрали в нормальном режиме работы сети, обусловленные ее резонансным смещением:

- Наиболее простой способ – расстройка компенсации в пределах допускаемых ПУЭ (т.е. +5 -10%). Возможности такой регулировки весьма ограничены. Да и ПУЭ рекомендует настраивать ДГР все же в резонанс.

- Снизить U_o можно уменьшением добротности Q сети. Обычно добиваются этого путем установки параллельно ДГР резистора, т.е. – увеличением активных потерь. В настоящее время этот способ наиболее распространен.

- Установка дополнительных реактивных элементов в одну из фаз относительно земли, частично компенсирующих «естественное» – имеющееся на данный момент смещение нейтрали сети [10].

- Введение «противоЭДС» в контур нулевой последовательности сети в ручном [10] или автоматическом режиме [11].

Увеличение добротности сетей в сочетании с высокоточной автоматикой управления современными ДГР обострило проблему пробоя изоляции кабелей при возникновении в сети ОЗЗ.

Основное достоинство сети с изолированной нейтралью – возможность работы при ОЗЗ – хорошо проявляется, если замыкание носит металлический характер. Изоляция кабелей и другого оборудования оказывается под стационарным перенапряжением, равным линейному напряжению сети, на которое оно должно быть рассчитано. Основная задача ДГР в этом режиме – за счет уменьшения тока через место ОЗЗ не допустить его разогрева.

Иная ситуация при перемежающихся ОЗЗ. Наличие ДГР сводит ток в месте замыкания к малым величинам и вероятность металлического ОЗЗ мала, то есть в месте пробоя образуется дуговой промежуток. При синусоидальном напряжении периодически происходит восстановление электрической прочности промежутка, но не происходит его деионизация и, как следствие, следует повторный пробой. Ток при пробое мал, но напряжение на изоляции

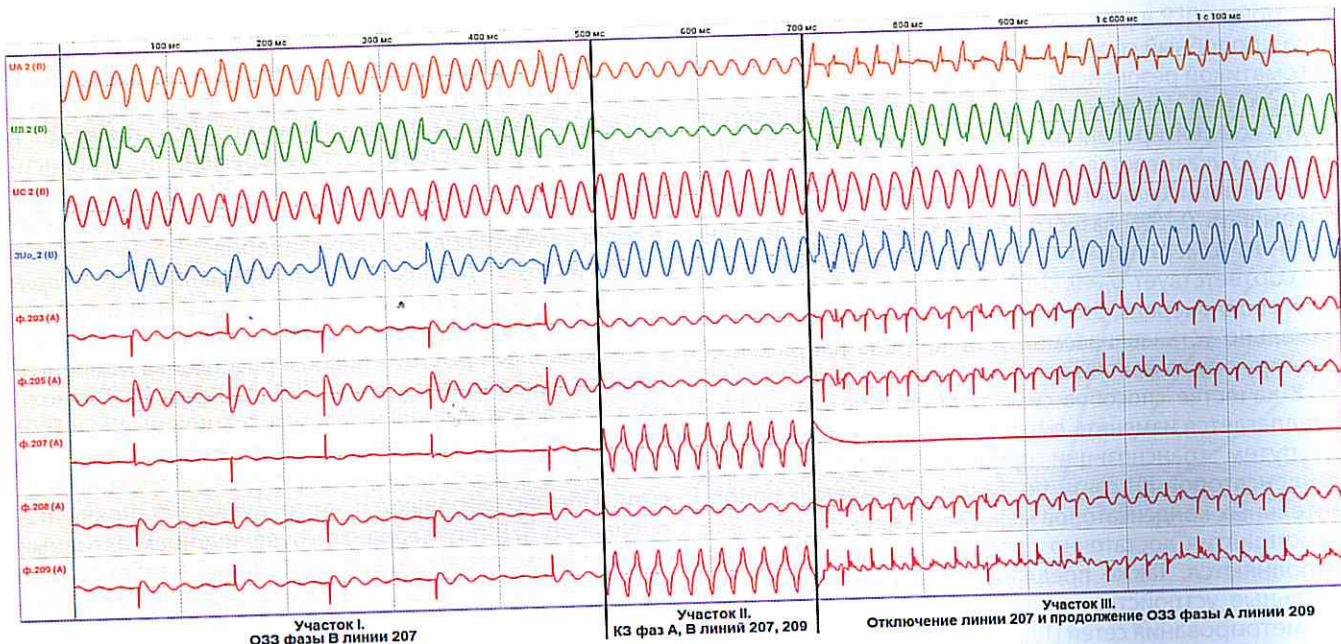


Рис. 4. Последовательное развитие замыкания на землю

кабелей «прыгает» от нуля до линейного значения (рис. 4), участки I и III. Такой режим может продолжаться до бесконечности, или пока промежуток не деионизируется и его электрическая прочность не станет выше напряжения на нейтрали сети.

Если перемежающееся ОЗЗ продолжается достаточно долго, наступает момент, когда происходит пробой изоляции на землю другой фазы сети и возникает двухфазное замыкание на землю (рис. 4), участок II. Такое замыкание сопровождается большими токами и отключается релейной защитой (РЗ). В разветвленной сети оба замыкания, как правило, относятся к разным фидерам. РЗ одного из фидеров срабатывает раньше, чем у другого. Ток ОЗЗ не успевшего отключиться фидера уменьшает-

ся, его отключение не происходит и в нем сохраняется режим ОЗЗ (рис. 4), участок III. Далее происходит ОЗЗ в очередном фидере и процесс повторяется. Результатом являются последовательные пробои кабелей сети.

Таким образом, ДГР спасает от пожара, но разрушает изоляцию кабелей при возникновении в сети ОЗЗ. Что делать в такой ситуации? Восстановление диэлектрических свойств изоляции в точке ее пробоя на землю происходит при удалении ионизированных частиц из разрядного промежутка. Для кабеля реально это возможно только за счет электродинамического усилия, создаваемого током, протекающим через место ОЗЗ. Настроенный в резонанс ДГР ($\nu=0$) практически сводит реактивный ток ОЗЗ к нулю и остается лишь активная составляющая тока, стремящаяся к нулю при высокой добротности сети. Увеличить ток ОЗЗ можно за счет дополнительного резистора, установленного параллельно ДГР. Чтобы не провоцировать дуговое ОЗЗ, ток не должен превышать 5А. Такая схема заземления нейтра-

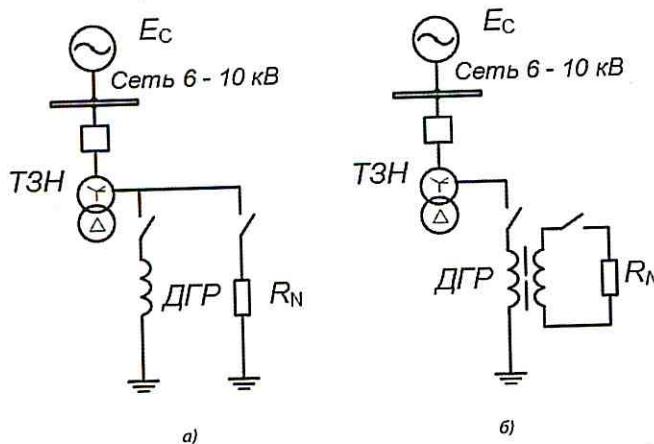


Рис. 5. Комбинированное заземление нейтрали

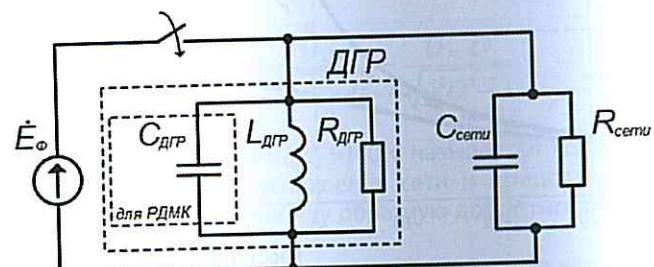


Рис. 6. Схема замещения сети с компенсацией емкостных токов

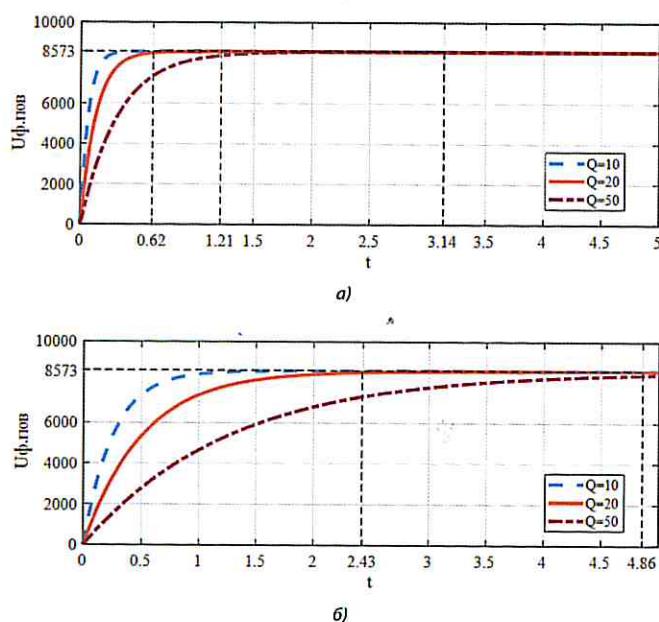


Рис. 7. Восстановление напряжения на поврежденной фазе с реакторами:
а) плунжерными (РДМР); б) конденсаторными (РДМК)

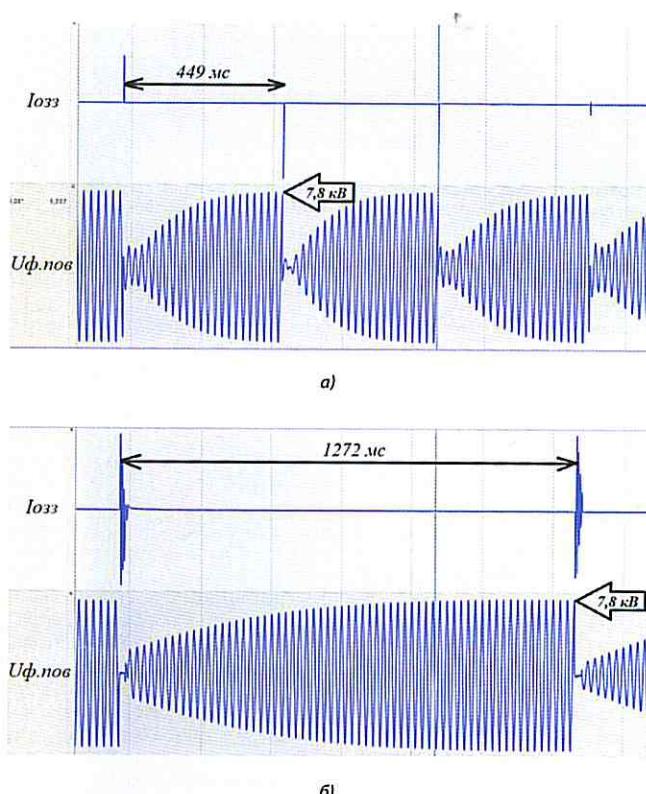


Рис. 8. Восстановление напряжения на поврежденной фазе с реакторами:
а) плунжерными РДМР; б) конденсаторными (РДМК)

ли, с резистором параллельно ДГР, в настоящее время является наиболее распространенной.

Резистор выполняет двойную роль – уменьшает величину резонансного смещения нейтрали и сокращает количество вторичных пробоев при ОЗЗ. Он может устанавливаться как с высокой стороны ДГР (рис. 5а), так и при наличии у ДГР вторичной обмотки, с низкой стороны (рис. 5б).

Деионизация дугового промежутка также зависит от скорости восстановления напряжения на поврежденной фазе. Чем ниже скорость восстановления напряжения на поврежденной фазе, тем больше вероятность, что диэлектрическая прочность дугового промежутка восстановится и повторного его пробоя не будет. Согласно [2] напряжение на поврежденной фазе $U_{\phi, \text{пов}}$ восстанавливается как

$$U_{\phi, \text{пов}} = U_{\text{MAX}} (1 - e^{t/2RC}), \quad (3)$$

где под U_{MAX} следует понимать фазное напряжение сети, а под R и C параметры КНП. В настоящее время наибольшее применение находят ДГР плунжерного типа (РДМР) и ДГР с конденсаторным регулированием индуктивности (РДМК) [12], имеющие принципиально различные параметры КНП. Схема замещения КНП для расчета времени восстановления напряжения $U_{\phi, \text{пов}}$ приведена на рис. 6. Очевидно, что суммарная емкость контура в случае применения РДМК больше, чем в случае РДМР и зависит только от мощности РДМК. В случае РДМР емкость определяется только текущей емкостью сети.

Для примера на рис. 7 приведены расчетные кривые восстановления напряжения для ДГР приблизительно одинаковой мощности: РДМР-485/10 и РДМК-500/10.

Графики приведены для емкостного тока сети 20 А. В случае с РДМК максимальный индуктивный ток принят равным 80 А (т.е. емкость сети в этом случае эквивалентна 80 А).

На рис. 8 представлены реальные осциллограммы испытания этих же ДГР при ОЗЗ через роговый разрядник.

Таким образом, дополнительный резистор и правильный выбор ДГР уменьшают вероятность пробоя кабелей при ОЗЗ, но не исключают ее.

Существует еще одна проблема компенсации емкостных токов – это активные потери в сети. Считается, что активный ток составляет 3–5% от емкостного тока [2]. Если емкостной ток сети 100 А, то активный ток может достигать 5 А, что соответствует устойчивому горению дуги. Например, для сети напряжением 10 кВ емкостной ток 100 А соответствует ДГР мощностью 800 кВА. Тем не менее, сети развиваются и на них все чаще устанавливаются ДГР значительно большей мощности. При этом упускается из виду, что при емкостном токе более 100 А ДГР не может обеспечить гарантированного гашения дуги.

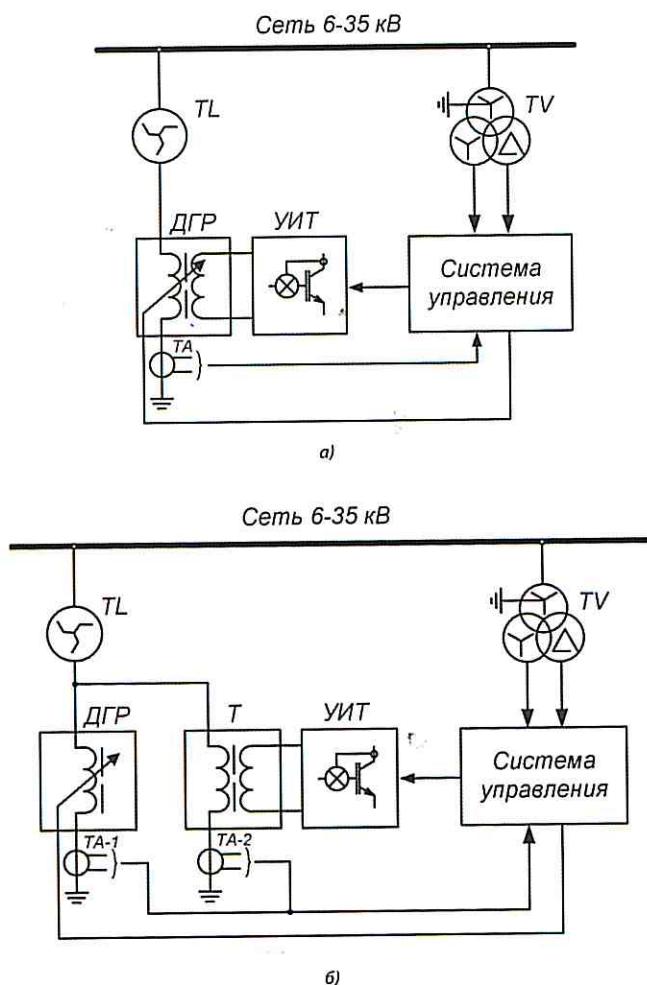


Рис. 9. Подключение УИТ при компенсации остаточного тока

Устанавливать ДГР большой мощности, без решения проблемы компенсации полного тока ОЗЗ, бессмыс-ленно.

Современная силовая электроника и цифровая техника позволяют достаточно надежно и эффективно решить проблему компенсации полного тока при ОЗЗ. Например, в эксплуатации уже более трех лет находится система гарантированного гашения дуги, разработанная «НПП Бреслер» [13].

Компенсация остаточного тока выполняется с помощью управляемого источника тока (УИТ), который подключается к специальной силовой обмотке ДГР (рис. 9, а) либо параллельно ДГР через согласующий высоковольтный трансформатор (рис. 9, б). В ряде случаев при модернизации существующей системы дугогашения последнее решение предпочтительнее, так как не требует менять уже имеющиеся на подстанции реакторы [13].

В результате компенсации полного тока ОЗЗ создаются условия для массового перехода дуговых повреждений в разряд самовосстанавливающихся.

Система позволяет не только практически избавиться от всех вышерассмотренных проблем заземления нейтрали, но и перейти к понятию сети с управляемым заземлением нейтрали.

Выходы

1. Развитие сетей с изолированной нейтралью ведет к росту токов замыкания на землю и вынуждает прибегать к их компенсации.

2. Компенсации емкостных токов замыкания на землю с помощью установки дугогасящих реакторов порождает ряд проблем: резонансное смещение нейтрали, склонность сети к повторным пробоям, ухудшающим изоляцию кабелей и т.д., которые необходимо знать.

3. Применение ДГР при токах ОЗЗ более 100 А не может обеспечить надежного гашения дуги из-за активных потерь в сети, способных самостоятельно поддерживать дугу, и является малоэффективным.

4. Гарантированное решение проблем, связанных с компенсацией емкостных токов замыкания на землю, может обеспечить только система полной компенсации токов ОЗЗ и управления нейтралью сети.

Литература

1. Калихман С.А., Злобин Ю.И. Режимы нейтрали и перенапряжения: Учебное пособие / Чуваш. ун-т. Чебоксары, 1994. - 64 с.
2. Вильгельм Р., Уотерс М., Заземление нейтрали в высоковольтных системах. - М.: Госэнергоиздат, 1959. - 415 с.
3. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации, утв. Приказом Министерства энергетики РФ от 19.06.2003 №229.
4. СТО 34.01.3-2-008-2017. Реакторы заземляющие дугогасящие 6-35 кВ. Общие технические требования, утв. Распоряжением ПАО «Россети» от 28.02.2017 №93р.
5. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. - М.: «Энергия», 1971.
6. Лихачев Ф.А. Инструкция по выбору, установке и эксплуатации дугогасящих катушек. - М.: «Энергия», 1971.
7. Черников А.А. Компенсация емкостных токов в сетях с незаземленной нейтралью. - М.: «Энергия», 1974. - 96 с.
8. Ванштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Режимы заземления нейтрали в электрических сетях. Учебное пособие. - Томск: «ТПУ», 2006. - 121 с.
9. Козлов В.Н., Петров М.И., Соловьев И.В. О способах выполнения автоматики управления ДГР // Релейная защита и автоматизация. - 2012. - №3 (08). - С. 14-19.
10. Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М. Режимы нейтрали электрических сетей. - Киев: «Наукова думка», 1985. - 264 с.
11. Пат. на изобретение 2663823 РФ, МПК H02J 3/18, H02H 3/14. Способ автоматического регулирования напряжения смещения нейтрали в компенсированной сети. / Ильин В.Ф., Булычев А.В., Матвеев Н.В., Козлов В.Н., Ефимов Н.С.; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «НПП Бреслер» (ООО «НПП Бреслер»). - №2017118017, заявл. 23.05.2017, опубл.: 10.08.2018 Бюл. №22.
12. Булычев А.В., Козлов В.Н., Салмин Н.О., Соловьев И.В. Дугогасящие реакторы с конденсаторным регулированием индуктивности // Релейная защита и автоматизация. - 2015. - №4 (21). - С. 56-59.
13. Булычев А.В., Дементий Ю.А. Экспериментальные исследования управляемого заземления нейтрали с функцией компенсации полного тока замыкания на землю в сетях 6-10 кВ // Релейная защита и автоматизация. - 2017. - №04 (29). - С. 37-41.