

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДУГОГАСЯЩИХ РЕАКТОРОВ

*Режим заземления нейтрали определяет такие важные характеристики сети 6–35 кВ, как надежность энергоснабжения потребителей, безопасность людей, находящихся вблизи места однофазного замыкания на землю, уровень изоляции электротехнического оборудования и т.д. В России в основном сейчас применяются режимы изолированной нейтрали и нейтрали, заземленной через дугогасящий реактор. При этом, несмотря на мнение большинства специалистов, считающих оптимальным для российских сетей резистивное заземление нейтрали, переход на этот режим осуществляется крайне медленно.*

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДУГОГАСЯЩИХ РЕАКТОРОВ

**Вадим Кричко, Игорь Миронов, филиал ОАО «Инженерный центр ЕЭС» – «Фирма ОРГРЭС», Москва**

В «Правилах технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации» [1] четко прописаны основные требования к режимам заземления нейтрали сетей 6–35 кВ через дугогасящие реакторы (ДГР). Так, в п. 5.11.10 ПТЭ сказано:

«Дугогасящие аппараты должны иметь резонансную настройку.

Допускается настройка с перекомпенсацией, при которой реактивная составляющая тока замыкания на землю должна быть не более 5 А, а степень расстройки – не более 5%. Если установленные в сетях 6–20 кВ дугогасящие реакторы имеют большую разность токов смежных ответвлений, допускается настройка с реактивной составляющей тока замыкания на землю не более 10 А. В сетях 35 кВ при емкостном токе замыкания на землю менее 15 А допускается степень расстройки не более 10%.

Работа с недокомпенсацией емкостного тока, как правило, не допускается. Разрешается применение настройки с недокомпенсацией лишь временно при отсутствии дугогасящих реакторов необходимой мощности и при условии, что аварийно возникающие несимметрии емкостей фаз не могут привести к появлению напряжения смещения нейтрали, превышающего 70% фазного напряжения».

В п. 5.11.12 ПТЭ сказано: «В сетях 6–10 кВ, как правило, должны применяться плавнорегулируемые дугогасящие реакторы с автоматической настройкой компенсации.

При применении дугогасящих реакторов с ручным регулированием тока показатели настройки должны определяться по измерителю расстройки компенсации. Если такой прибор отсутствует, показатели настройки должны выбираться на основании результатов измерений тока замыкания на землю, емкостных токов, тока компенсации с учетом напряжения смещения нейтрали».

### СТАТИСТИКА

В 2004–2005 гг. ОРГРЭС провел опрос почти 50 энергосистем России на предмет уровня оснащённости сетей 6–35 кВ ДГР. По этим данным, суммарное количество сетей (секций) 6–35 кВ на начало 2005 г. составило 25264 (в исследовании не учитывались энергосистемы Москвы и Петербурга ввиду их особой специфики).

Общее количество сетей, в которых, согласно п. 5.11.8 ПТЭ, необходимо применять компенсацию емкостного тока, составило 2632 штук (т.е. около 10,4% от общего числа сетей). Причем в этих сетях установлено 2419 дугогасящих реакторов, что составляет 91,9% от общей потребности в них.

По данным ОРГРЭС, в России в сетях 6–35 кВ с компенсацией емкостного тока применяется 1986 ступенчатых дугогасящих реакторов (75,5% от общего числа ДГР) и 433 плавнорегулируемых реактора (24,5%).

То, что почти 3/4 установленных на сегодняшний день дугогасящих реакторов составляют ступенчатые ДГР, объясняет тот факт, что в п. 5.11.10 ПТЭ до сих пор допускаются такие «странные» расстройки компенсации. Почти 95% ступенчатых реакторов – это реакторы типа ЗРОМ или РЗДСОМ, которые на протяжении 50 лет выпускались по устаревшим ТУ, в которых было предусмотрено только 5 ответвлений. В то же время, например, в Германии еще 50е годы прошлого столетия ступенчатые дугогасящие реакторы выпускались с 16 отпайками. Большинство плавнорегулируемых реакторов (403 шт., или 93,1%) составляют плунжерные реакторы типа РЗДПОМ (производства ПК «ХК Электрозавод», ЦРМЗ «Мосэнерго» и др.) или аналогичные реакторы западного производства (ZTC, GEUF и т.п.).

Автоматическими регуляторами оснащены (находятся в работоспособном состоянии) только 223 плавнорегулируемых реактора, что составляет 51,5% от потребности. Этот факт объясняется тем, что до последнего времени плунжерные реакторы типа РЗДПОМ не комплектовались автоматическими регуляторами на заводеизготовителе.

Как показывает практика, многие из установленных на плунжерных ДГР автоматических регуляторов (РНДК, БАНК, БАПК, УАРК и т.п.) проработали по 20–30 лет, выполнены на устаревшей элементной базе и зачастую представляют собой единичные опытные (а не серийные) экземпляры устройств. Поэтому реально уровень автоматизации плунжерных дугогасящих реакторов намного ниже 50%.

Чуть менее 7% от обследованных плавнорегулируемых реакторов – это дугогасящие реакторы с подмагничиванием (РДП, КДР, РУОМ, РЗДУОМ). Первые образцы дугогасящих реакторов с подмагничиванием были установлены более 30 лет назад. Все они управляются в ручном режиме, и до сих пор ни на одном из реакторов с подмагничиванием типа КДР или РДП не установлено ни одного автоматического регулятора (за исключением нескольких образцов, установленных в сетях 6–10 кВ целлюлознобумажных комбинатов, где применено ступенчатое регулирование тока компенсации).

### **ДГР С ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ**

Как показала практика эксплуатации дугогасящих реакторов с подмагничиванием, основной их проблемой является отсутствие правильно и надежно работающих систем автоматического управления. За время с первых попыток создания автоматических систем управления ДГР с подмагничиванием были перепробованы все известные принципы регулирования (амплитудный, фазовый, ШИМмодуляции, непромышленной частоты и т.п.). Однако на сегодняшний день ни один из них не дал искомых результатов.

В то время как у плунжерных ДГР принципы автоматического управления остаются неизменными на протяжении последних 50 лет, изменялась только элементная база регуляторов. Особо следует подчеркнуть полное отсутствие в современных публикациях о ДГР с подмагничиванием (в отличие от плунжерных реакторов) экспериментальных осциллограмм дуговых и металлических замыканий на землю, без которых невозможно оценить реальные параметры реакторов с подмагничиванием – нелинейность вольтамперной характеристики, процент гармоник в токе компенсации, время выхода на резонансную настройку и т.п. Результаты обследования находящихся в эксплуатации плавнорегулируемых реакторов с подмагничиванием типа РУОМ (РЗДУОМ, РОУ) показали, что энергопредприятия постоянно сталкиваются с определенными трудностями в автоматическом управлении данными реакторами. По состоянию на конец 2005 г., из 30 обследованных реакторов с подмагничиванием с автоматическими регуляторами только 7 постоянно работают в автоматическом режиме. На остальных реакторах с подмагничиванием автоматика или представлена в виде опытных образцов, которые до конца не введены в работу, или выведена эксплуатацией из работы по причине её частых сбоев.

Анализ принципов автоматического управления реакторами с подмагничиванием показал, что

в большинстве образцов регуляторов заложен неверный подход. Так, например, в реакторах типа РУОМ в нормальном режиме работы обмотка подмагничивания не обтекается током, а его индуктивность составляет какое-то минимальное базовое значение и не совпадает с емкостным сопротивлением сети. При возникновении металлического замыкания на землю автоматика за счет форсированного увеличения тока подмагничивания подстраивает индуктивность РУОМ в резонанс с емкостью сети. Ввиду инерционности насыщения магнитной системы реактора с подмагничиванием это происходит за 10–15 периодов промышленной частоты. При дуговых замыканиях автоматика ДГР с подмагничиванием (из-за инерционности выхода на рабочий режим) блокирует его работу.

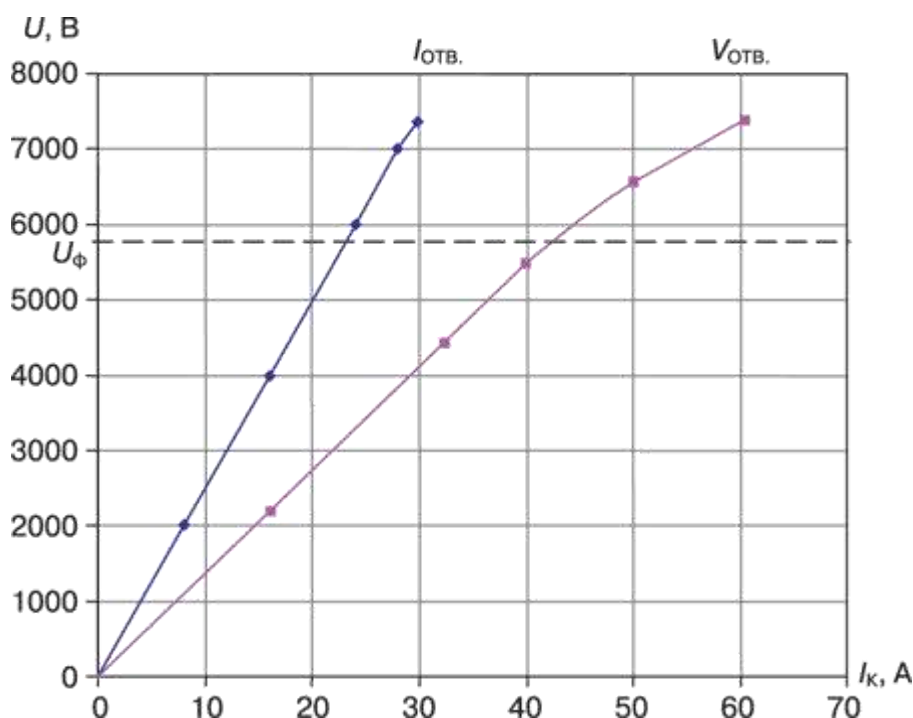
Следовательно, РУОМ при дуговом замыкании работает как обычный ступенчатый реактор с очень большой расстройкой компенсации ( $\sim 30\text{--}40\%$ ). То есть для реакторов с подмагничиванием теряется смысл самого названия «дугогасящий», так как при такой расстройке компенсации дуговое замыкание может происходить каждый полупериод. И существует большая вероятность того, что за счет эскалации перенапряжений произойдет пробой на другой фазе и возникнет КЗ раньше, чем на поврежденной фазе дуговое замыкание перейдет в металлическое.

Автоматические регуляторы реакторов типа РЗДУОМ настраивают ДГР с подмагничиванием в нормальном режиме работы сети. Основная проблема заключается в том, что в них заложен принцип регулирования по амплитуднофазовым характеристикам контура нулевой последовательности. Хорошо известно, что реакторы с подмагничиванием имеют нелинейную зависимость тока компенсации от тока подмагничивания  $I_k = f(I_p)$  (рис. 1), а также нелинейную вольтамперную характеристику  $U = f(I_k)$  (рис. 2) в начальной части в районе  $0,05\text{--}0,15$  Уф и в районе  $0,9\text{--}1,1$  Уф.

Поэтому для реакторов с подмагничиванием неприменимы регуляторы, использующие фазовый и экстремальный принципы регулирования. Данные регуляторы могут применяться только для плунжерных реакторов, обладающих достаточной линейностью ВАХ (рис. 3). Довольно серьезной проблемой ДГР с подмагничиванием является их вклад в ток замыкания на землю довольно значительной составляющей токов высших гармоник, которая может составлять до 10–15% от емкостного тока. Этот факт, а также увеличенные активные потери при максимальных токах подмагничивания создают условия для длительного горения заземляющих дуг. А при металлическом замыкании на землю (даже в случае резонансной настройки) остаточный ток в месте замыкания (активная составляющая + высшие гармоники) имеет довольно значительную величину, что сводит на нет все преимущества компенсации емкостного тока.



**Рис. 3. Вольтамперная характеристика плунжерного дугогасящего реактора РЗДПОМ480/10 кВ**



### **СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТУПЕНЧАТЫХ И ПЛУНЖЕРНЫХ ДГР**

В многочисленных статьях, опубликованных в последнее время, отмечается тот факт, что в сетях с компенсацией емкостного тока зачастую уже не хватает мощности установленных ДГР. И на этом основании предлагается вообще отказаться от компенсации емкостного тока. Но, как указывалось выше в п. 5.11.10 ПТЭ, разрешается временная работа с недокомпенсацией при отсутствии ДГР необходимой мощности. И решение этого вопроса в последние 15–20 лет скорее лежало не в технической, а в экономической области.

Сегодня в энергосистемах идет планомерное внедрение плунжерных дугогасящих реакторов необходимой мощности с учетом перспективного развития сетей. Для подстанций, на которых ранее были установлены ступенчатые ДГР, рядом проектных институтов разработан и внедряется способ параллельной установки ступенчатого и плунжерного реакторов с автоматическим регулированием (рис. 4).

### **СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДГР И РЕЗИСТОРОВ В НЕЙТРАЛИ**

В последнее время также успешно внедряется и этот способ. Однако его эффективность может быть снижена из-за неправильного выбора ДГР и резистора. Наиболее правильное решение – установка плунжерного ДГР с автоматической настройкой в резонанс (рис. 5).

Тогда при дуговых замыканиях на землю будут проявляться все положительные стороны резонансной настройки компенсации емкостных токов, т.е. снижение перенапряжений до безопасных для изоляции значений 2,2–2,4  $U_{\phi}$ , надежное гашение заземляющей дуги, снижение скорости восстановления напряжения на поврежденной фазе.

При металлическом замыкании на землю параллельно ДГР подключается резистор на время, достаточное для срабатывания защиты от замыкания на землю.

При параллельном включении ступенчатого ДГР и резистора эффективность компенсации емкостного тока резко падает, так как основной упор делается на резистор и селективную работу защит от ОЗЗ и соответственно не ведется настройка компенсации.

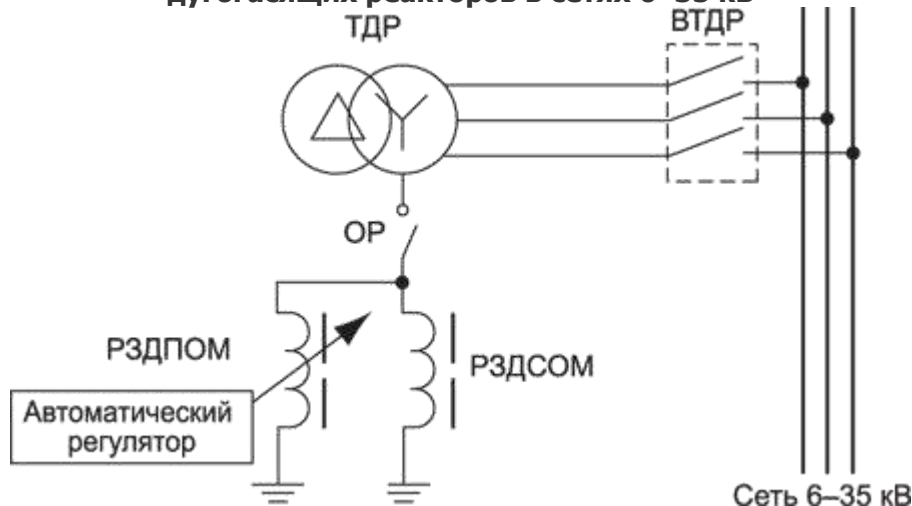
Параллельное включение ДГР с подмагничиванием и резистора представляется нецелесообразным. Как показано выше, автоматика ДГР с подмагничиванием при дуговых замыканиях блокируется, а при металлическом ОЗЗ начинает подстраивать ток компенсации к резонансному значению. Изза возникающих при этом на нейтрали сети колебаний, защиты от ОЗЗ будут работать неселективно и соответственно пропадет весь эффект от внедрения резистора.

### ВНЕДРЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ДГР

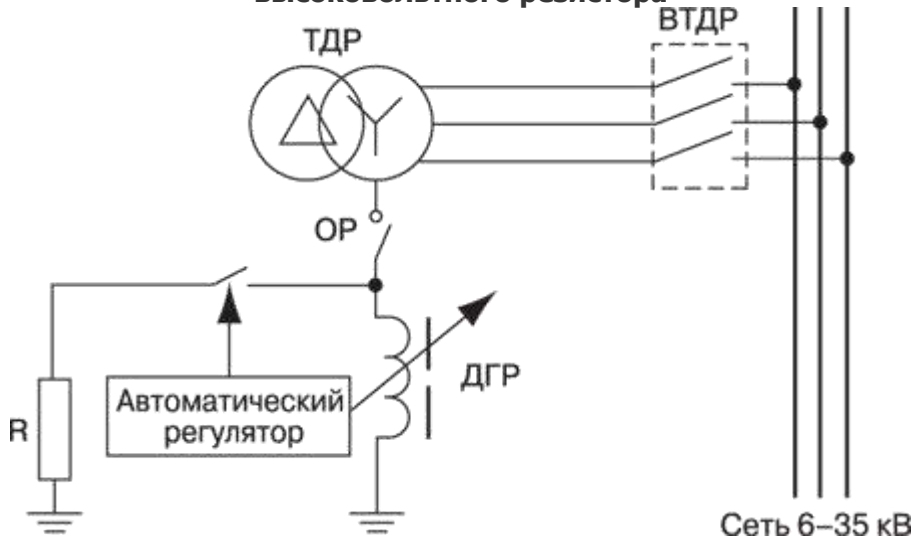
В ряде европейских стран (Германия, Чехия, Австрия и др.) в сетях с резонансным заземлением нейтрали используются совместно ДГР и резистор. В сетях среднего напряжения этих стран эксплуатируются ДГР со специальной вторичной обмоткой, к которой может быть подключен низковольтный резистор (рис. 6).

При дуговых замыканиях на землю проявляются все положительные стороны компенсации емкостных токов, т.е. настроенный автоматикой в резонанс ДГР снижает перенапряжения до приемлемого с точки зрения эксплуатации уровня. При металлическом замыкании на землю к специальной дополнительной обмотке ДГР подключается резистор на время, достаточное для срабатывания защит от замыкания на землю.

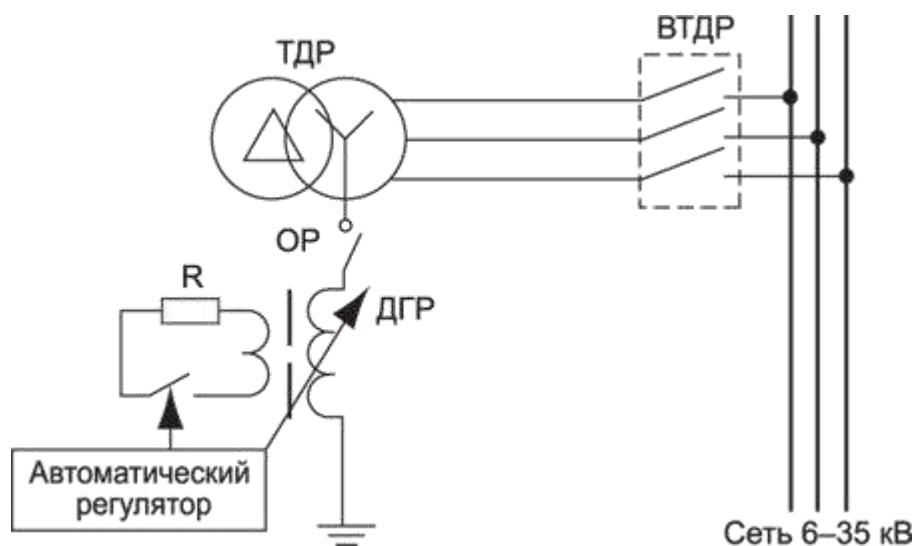
**Рис. 4. Схема параллельного подключения ступенчатого и плунжерного дугогасящих реакторов в сетях 6–35 кВ**



**Рис. 5. Схема подключения плунжерного дугогасящего реактора и высоковольтного резистора**



**Рис. 6. Схема подключения дугогасящего реактора и низковольтного резистора**



## ВЫВОДЫ

1. В сетях 6–35 кВ, в которых согласно п. 5.11.8 ПТЭ нужна компенсация емкостного тока замыкания на землю, целесообразно применять плунжерные ДГР с автоматической настройкой в резонанс.
2. Не рекомендуется внедрение в сетях 6–35 кВ ДГР с подмагничиванием ввиду недоработанности их автоматических регуляторов, которые не обеспечивают резонансную настройку, и плохих метрологических характеристик самих реакторов (большие активные потери на максимальных токах подмагничивания, большой процент высших гармоник в токе компенсации).
3. Для «резистивноиндуктивного» способа заземления нейтрали сетей 6–35 кВ необходимо применять только плунжерные ДГР. Применение совместно с резистором ступенчатых ДГР и дугогасящих реакторов с подмагничиванием менее эффективно.

Источник: news.elteh.ru