

Авторы:

к.т.н. Ширковец А.И.

ООО «Болид», Новосибирск, Россия,

Валов В.Н.

ФБГОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Россия,

к.т.н. Петров М.И.

ФБГОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова» -

ООО ВП «ПРОЦИОН»,

Чебоксары, Россия.

PhD Shirkovets A.I.

BOLID LLC, Novosibirsk, Russia,

Valov V.N.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia,

PhD Petrov M.I.

Chuvash State University - PROCION LLC, Cheboksary, Russia.

ЗАДАЧИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ КОМПЕНСАЦИИ ТОКА ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

TASKS FOR AUTOMATIC CONTROL OF GROUND FAULT CURRENT COMPENSATION

Аннотация: в настоящей статье представлены и проанализированы задачи, возникающие при разработке и эксплуатации современных систем автоматического управления режимом компенсации емкостного тока. Показано, что управляющий сигнал для регулирования индуктивного тока дугогасящего реактора, независимо от производителя и типа автоматики, формируется по результатам измерения амплитудных и фазовых характеристик напряжения на нейтрали или первичных параметров контура нулевой последовательности. Отмечено, что для повышения точности настройки компенсации до 1% требуется учет параметров, связанных с конструктивными особенностями реакторов и методикой измерения для конкретного принципа управления. Предложены технические требования к автоматике управления, которые призваны обеспечить ее работоспособность в сетях разной конфигурации, конструкции и с различным характером нагрузки.

Ключевые слова: автоматика управления, компенсация емкостного тока, замыкание на землю, контур нулевой последовательности, смещение нейтрали, добротность, инжекция тока.

Abstract: tasks are presented and analyzed in the paper, which occur during development and operation of modern automatic control systems for capacitive current compensation. It is shown that a driving signal for Petersen coil inductive current control is obtained based on measurement of amplitude and phase characteristics of a neutral voltage or on measurement of zero-sequence circuit primary parameters, regardless of a manufacturer or a type of a control system. It is pointed out that parameters should be taken into account, which concern design features of a coil and measurement method for each control principle, to bring up compensation accuracy to 1%. Technical requirements are proposed to control systems, which are to provide operability of these systems for networks of different design, configuration and load type.

Keywords: automatic control, capacitive current compensation, ground fault, zero-sequence circuit, neutral displacement, Q-factor, current injection.

Введение

Для снижения негативных последствий от протекания тока замыкания на землю и обеспечения электробезопасности в электрических сетях, допускающих длительное существование режима однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), согласно [1, п. 1.2.16; 2, п. 5.11.8] выполняется компенсация емкостного тока (КЕТ). Правильное ведение режима КЕТ сопряжено с необходимостью периодической подстройки дугогасящего реактора (ДГР) с помощью автоматики управления в режим, близкий к резонансу, что соответствует относительно точному равенству индуктивной и емкостной эквивалентных проводимостей сети относительно земли. Технически достижимая точность настройки современных реакторов составляет $v = \pm(1 \div 5)\%$ и может быть обеспечена при условии учета и автокоррекции ряда факторов. К последним относятся методические погрешности способа формирования и частоты «тестовых» сигналов для измерения параметров контура нулевой последовательности (КНП), скорость движения и инерционность механизма изменения воздушного зазора (для плунжерного ДГР), задержки и шаг переключения регулировочных шунтирующих емкостей (для статического ДГР), предварительная уставка тока подмагничивания и насыщение

реактора в «ждущем режиме» (для ДГР с подмагничиванием параллельного возбуждения) и т.д.

Требуемую эффективность КЕТ, обеспечивающую ~80 – 90% самоустранившихся ОЗЗ, можно обеспечить при $v \leq 1 - 2\%$ [3]. Практические доказательства этого положения в эксплуатации предложены по результатам анализа аварийности и контроля настройки системы компенсации в сети 6 кВ металлургического комбината. Показано, что при выполнении требований точной настройки системы КЕТ (2010 г.) по сравнению с ручным управлением ДГР (2001 г.) практически на порядок снизилась доля переходов ОЗЗ в междоузельные КЗ с групповым отключением линий, более чем в 20 раз уменьшилось количество фидеров, требующих аварийно-восстановительного ремонта после электрических повреждений [4].

Несмотря на широкое внедрение и безусловное преимущество систем компенсации, оснащенных устройствами автоматического управления, уровень автоматизации управляемых ДГР не превышает 60-70%, в том числе за счет ненастроенных, выведенных из работы и заблокированных регуляторов.

Наиболее распространенными являются виды автоматики, выполняющие настройку компенсации в нормальном режиме сети, поскольку преимущественно используемые в на-



стоящее время ДГР – это плунжерные и статические аппараты, которые не допускают регулирования тока под нагрузкой (в режиме замыкания). Разработаны устройства автоматики, применяемые с ДГР с предельным насыщением магнитной системы и предусматривающие настройку реактора после возникновения замыкания [5]. Это позволяет предупредить резонансные явления при высоких значениях напряжения несимметрии и ненормированное смещение нейтрали сети. Однако обеспечить заявляемое высокое быстродействие таких систем КЕТ (0,02 с), равно как и высокую точность настройки (2 – 5%), пока не удалось [6].

Как наиболее эффективные рассматриваются устройства компенсации, предусматривающие настройку ДГР как в нормальном режиме эксплуатации, так и при однофазных замыканиях [7], что может быть актуально при отключении участков сети и изменении емкостного тока. Возможность управления током компенсации в режиме замыкания достигается, в частности, путем продольного подмагничивания магнитопровода дугогасящего реактора [8]. Следует отметить, что в режимах длительных дуговых замыканий регулирование тока подмагничивания может привести к перенасыщению магнитной системы и броскам индуктивного тока реактора в 2 – 3 раза относительно режима устойчивого замыкания, что резко снизит эффективность КЕТ.

Современные системы автоматического управления режимом компенсации

Автоматика управления ДГР призвана обеспечить управление режимом КЕТ во всем диапазоне изменения тока реактора при любых изменениях конфигурации распределительной сети, в том числе объединении секций шин; в сетях как с кабельными, так и воздушными и смешанными линиями, а также при низкой добротности КНП. Практически все производители ДГР имеют возможность оснащения их собственной автоматикой управления, отличающейся принципами настройки реактора [7, 9, 10].

Большинство находящихся в

эксплуатации автоматических регуляторов ДГР используют экстремальный и фазовый принципы управления (УАРК-101М, РНДК-1, БАПК, РАНК-2, БАНК-5/6/7, МИРК-3/4/5, РАНПР, REG-DP, EFC-50), которые, в силу зависимости фазовой характеристики от параметров небаланса элементов сети, не способны поддерживать в сети заданный режим КЕТ без применения специальных мер по искусственному смещению нейтрали. Это достигается с помощью дополнительного высоковольтного конденсатора (МИРК-4.2/5, ООО «Микро-Инжиниринг»), нейтралеобразующего трансформатора с изменяемым коэффициентом трансформации по одной фазе (ТМПС-6(10) кВ и УАРК-101/105, ООО ВП «НТБЭ»), введения в нейтраль через сигнальную обмотку ДГР ограниченного индуктивности токового сигнала (РНДК-1, РАНПР) от сети 50 Гц и т.п. При этом нарушается симметрия фазных напряжений. Корректная работа регулятора на фазовом/амплитудном принципе может быть обеспечена с помощью устройства кратковременного возбуждения нейтрали (поставляется опционально с УАРК-105).

В качестве параметра по управлению целесообразно использовать как первичные параметры КНП – измеренные значения индуктивности реактора, фазной емкости относительно земли и сопротивления потерь (автоматика ШЭА1002 ООО ВП «ПРОЦИОН»), так и частоту собственных колебаний КНП, полученную по результатам «отклика» сети после инъекции «тестового» сигнала в нейтраль через обмотку управления ДГР. Принцип определения ожидаемого емкостного тока заключается в вычислении его значения с использованием известной величины тока ДГР и измеренной величины расстройки компенсации с учетом добротности КНП (устройства Бреслер-0107.060), Вариация метода управления в устройствах REG-DPA («A-Eberle», Германия) и EFCi-50 («Trench Austria GmbH», Австрия) связана с использованием метода наложения синтезированного двухчастотного сигнала из тока промышленной сети 50 Гц в нейтраль электрической сети [11]. Коллективом авторов из Томского политех-

нического университета предложено подобное решение, отличающееся возможностью введения в КНП сигнала от двух генераторов непромышленной частоты через обмотку со схемой «разомкнутый треугольник» трансформатора напряжения [12]. Способ позволяет обеспечить измерение расстройки компенсации емкостного тока при изменении коэффициента демпфирования d в диапазоне от 0,05 до 0,2 с методической погрешностью, сниженной от 0,00124 до 0,02 соответственно.

Теоретически метод возбуждения нейтрали на непромышленной частоте позволяет с высокой точностью определить степень расстройки при изменениях емкостного тока сети и тока реактора независимо от добротности КНП, а также естественной несимметрии сети. Длительность инжектируемого через обмотку управления реактором импульса тока составляет, как правило, до 10 мс. Частота его повторения в режиме настройки плунжерных ДГР задается вручную уставками от 5 Гц до долей герц. Более 5 Гц устанавливать не рекомендуется, поскольку сужается диапазон измеряемой расстройки в сторону от максимальной недокомпенсации.

Системы САНК-4.1 и САМУР, которыми оснащены ДГР с подмагничиванием, используют метод возбуждения нейтрали напряжением от генератора переменной частоты $\neq 50$ Гц с диапазоном изменения сигнала 20 – 80 Гц [13]. Серьезным недостатком является высокая длительность одного цикла измерения частоты колебаний КНП (для САНК 4.1 это 40 – 80 с) для периодической проверки уставки тока компенсации реактора. В режиме удержания ОЗЗ изменение конфигурации сети при такой длительности измерения приводит к ненормативным расстройкам компенсации. Эксперименты показали, что фактическое время изменения тока реактора с насыщением магнитной системы после изменения емкостного тока уже в режиме замыкания достигает 1,5 – 5,5 минут [6].

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики выпускаемых и эксплуатируемых в настоящее время в отечественных сетях 6 – 35 кВ



Табл. 1. Сравнительные характеристики устройств автоматического регулирования тока ДГР

Тип регулятора	Применяется с ДГР	Точность настройки ¹⁾	Расстройка компенсации ²⁾	Сохранение информации об аварийных режимах работы / осциллограф	Функция определения поврежденного фидера (ОПФ) ³⁾	Работоспособность автоматики в сети с низкой добротностью ⁴⁾	Производитель автоматики
МИРК -5	РЗДПОМА	±1%	-100...+95%	да, возможен режим самописца	да, по заказу	нет	ООО «Микро-Инжиниринг», Москва
УАРК - 10S	плунжерного типа	±1%	-100...+95%	да	да, при использовании ПЗЗМ -3	да, при использовании блока возбуждения нейтрали	ООО ВП «НТБЭ», Екатеринбург
САМУР	с подмагничиванием (РУОМ)	±5%	нет данных	да, без осциллографа	нет	да	ОАО «РЭТЗ «Энергия»/ ООО «АСУ Газоочистка», Москва
САНК - 4.2	с подмагничиванием (РУОМ)	±2%	нет данных	да, без осциллографа	да, при авто-или ручной расстройке 10-20 А на 1-2 с	нет	ООО «Энергия-Т», Тольятти
САНК - 5.1	плунжерного типа	±2%	нет данных	да, без осциллографа	нет	да, при искусственном смещении нейтрали от специального генератора	ООО «Энергия-Т», Тольятти
Бреслер-0107.060	плунжерного типа, дискретного типа (статические)	±1 %	- 400...+85%	да	есть	да	ООО «НПП Бреслер», Чебоксары
ШЭА1002	плунжерного типа, дискретного типа (статические), с частичным и полным подмагничиванием	±1%	-800...+95%	да	есть	да, управление добротностью	ООО ВП «ПРОЦИОН», Чебоксары
REG-DPA	плунжерного типа	не хуже ±5 ⁵⁾	нет данных	да, возможен режим самописца	есть, за счет подключения шунтирующего резистора на 13 с	да, при правильной настройке	«A-Eberle», Германия
EFC-50(i)	плунжерного типа	не хуже ±5 ⁵⁾	нет данных	да, возможен режим самописца	есть	да, при правильной настройке	«Trench Austria GmbH», Австрия

1) относительно 50 Гц емкостного тока ОЗЗ

2) при которой автоматика способна функционировать

3) при замыкании на землю, ток от высокоомного резистора в нейтрали способствует увеличению полезного сигнала для алгоритмов ОПФ

4) в том числе комбинированным заземлением нейтрали, без введения искусственной однофазной несимметрии

5) значение не указано в документации на автоматику, но должно соответствовать требованиям ПТЭ

устройств автоматического регулирования тока компенсации ДГР. Расстройка «-800%» означает, что частота собственных колебаний в сети составляет 150 Гц, а она измеряется с точностью, не меньшей, чем частота тока сети. При этом индуктивный ток в 9 раз больше емкостного. Недокомпенсация «+90%» соответствует частоте 15,8 Гц, за счет чего длительность ее измерения возрастает до значений не менее 100 – 200 мс.

Обеспечение точности настройки дугогасящего реактора

Согласно табл. 1 заявляемая точность настройки реактора в резонанс для ряда производителей составляет $|v| = \pm 1\%$. Однако техническая реализация этого требования, фигурирующего в тендерной документации ОАО «ФСК ЕЭС» с 2006 г., связана с очевидной сложностью его обеспечения. Ошибка настройки реактора, особенно в диапазоне малых

токов, в ряде случаев связана с «выбегом» плунжера ДГР в зависимости от скорости его движения: для реакторов ЗТС время перестройки из максимального положения в минимальное составляет 180 с, Trench – 120 с, РЗДПОМА – 90 с, РДМР – 45 с. На расстройку влияет длительность измерения параметров КНП и проверки степени расстройки: если она достигает 0,1 – 0,5 с, то при работе в сети с токами 10 – 20 А плунжер реактора при скорости 2 А/с успевает изменить немагнитный зазор настолько, что индуктивный ток меняется на 0,2 – 1,0 А и только тогда формируется команда на останов. Расстройка компенсации, без учета инерции привода, в этих условиях окажется в диапазоне $|v| = 10\%$. Следовательно, для правильного регулирования необходим автоматический учет механических параметров и кинематической схемы привода реактора. Действенным способом повышения селективности си-

стемы компенсации емкостных токов является переход к принципиально иной – статической – конструкции реактора, предусматривающей преднамеренное увеличение общей емкости КНП посредством включения дополнительного (регулируемого) высоковольтного конденсатора параллельно с рабочей обмоткой ДГР или управляемой автоматикой конденсаторной батареи во вторичную обмотку ДГР типа РДМК(у)/РДСК(у). Предложенные варианты включения реактивных элементов оказывают симметрирующий эффект на фазные напряжения сети.

Точность настройки статических реакторов типа РДМК(у)/РДСК(у) определяется только количеством ступеней регулирования, зависящим от схемы коммутации, и единичной емкости конденсаторов во вторичной обмотке: по сути это мелкоступенчатый реактор. Так, при максимальном токе ДГР не более 100 А и изменении первичного индуктивного

тока дискретой в 1 А, как видно из приведенных выше положений, настройка производится с точностью $|v| \geq 1\%$ и тем лучше, чем меньше ток ступени. Корректная оценка степени расстройки и формирование управляющего сигнала для исполнительного механизма ДГР зависят от класса точности преобразовательных датчиков, правильного учета коэффициента трансформации между первичной и вторичной обмоткой реактора. Методическую погрешность способа измерения параметров КНП с наложением тестового сигнала следует минимизировать: если частота тока сети принимается равной константе (50 Гц, без измерения), то ее отклонение на 0,1 Гц приводит к появлению ошибки измерения расстройки 0,4%.

Исходя из этих положений, представляется технически целесообразным применять предложенные выше мероприятия в части внедрения частотных приводов для управления скоростью изменения тока ДГР и искусственного поддержания эквивалентной емкости сети с целью обеспечения настройки на резонанс плунжерных ДГР с требуемой точностью $\pm 1\%$ в области малых токов компенсации.

Сверхнормативное смещение нейтрали

Одной из объективных причин, не позволяющей выполнить предварительную настройку реактора в резонанс в нормальном режиме, является несимметрия фазных емкостей, например, в сети нетранспонированными воздушными линиями. Транспонирование фазных проводников является весьма затратным мероприятием и для сетей 6-35 кВ практически не применяется. В ряде случаев для выравнивания емкостей по фазам используют перераспределение конденсаторов ВЧ связи или методы, обеспечивающие снижение добротности КНП. Последние дают наиболее устойчивый эффект.

Смещение нейтрали, обусловленное несимметрией фазных емко-

стей, определяется как:

$$U_N = U_\phi \frac{\alpha}{\sqrt{v^2 + d^2}},$$

где U_ϕ – фазное напряжение сети; α – коэффициент, учитывающий степень отличия (уменьшения) емкости на одной фазе.

На рис. 1 показаны зависимости отношения смещения нейтрали к фазному напряжению сети от расстрой-

ки компенсации при различных значениях коэффициента демпфирования d и однофазной несимметрии 5% и 10% ($\alpha = 0,017$ и $0,034$ соответственно). Смещение нейтрали превышает допустимое значение $0,15U_\phi$ при расстройках до 20%.

Следует отметить, что кривые, приведенные на рис. 1, идеализированы и фактически максимум напряжения на нейтрали не точно соответствует значе-

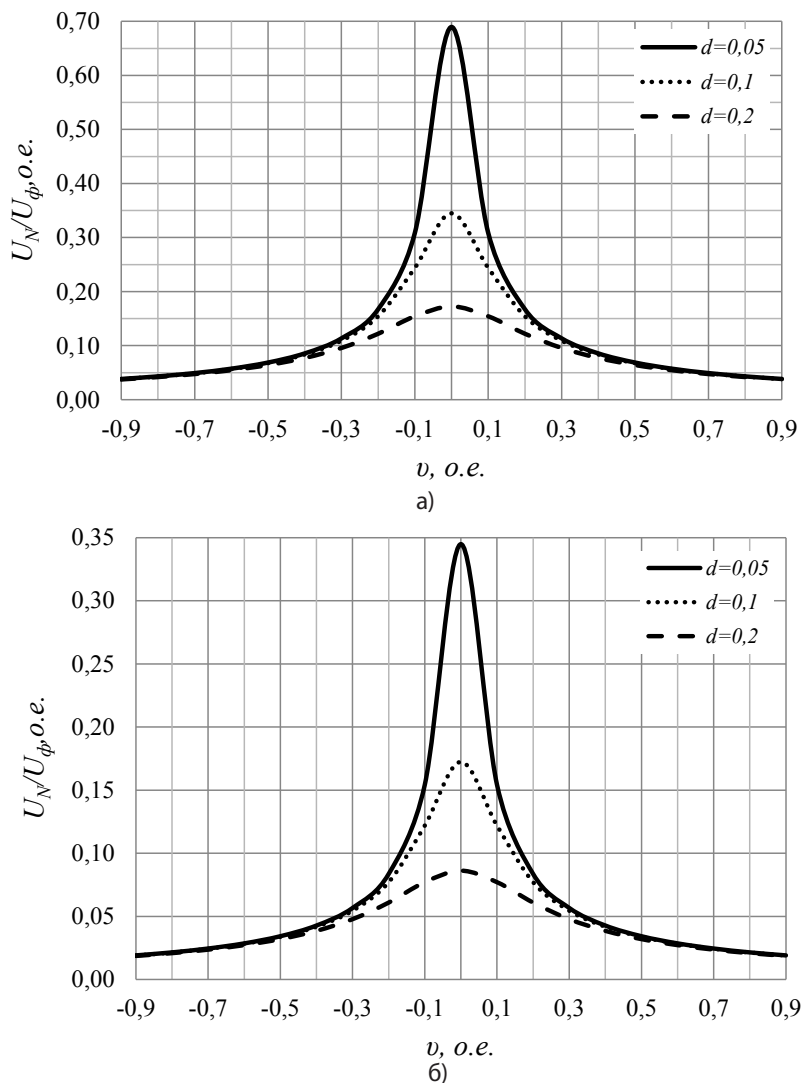


Рис. 1 Зависимость относительного напряжения смещения нейтрали от степени расстройки компенсации при $\alpha=0,034$ (а) и $\alpha=0,017$ (б)



нию $v = 0$, а несколько смещен в сторону перекомпенсации, в зависимости от добротности КНП. Можно показать, что кривые рис. 1 должны быть сдвинуты по оси абсцисс относительно резонанса: оценочно на -0,2% при $d = 0,05$; на -0,5% при $d = 0,1$ и на -2% при $d = 0,2$.

Из рис. 1 следует, что при отличии емкости одной из фаз на 5 – 10 % несимметрия уровнем $(0,017 - 0,034)U_{\phi}$ при включении ДГР с $|v| \rightarrow 0$ и коэффициенте демпфирования сети $d = 0,05$ приводит к росту смещения нейтрали в 10 – 20 раз, что может спровоцировать срабатывание сигнализации по $3U_0$ (эффект «ложной земли»). Высокие значения смещения нейтрали приводят к блокировке автоматики управления ректором, для исключения чего приходится расстраивать реактор с $|v| > 10\%$. Распространенным решением рассмотренной проблемы является повышение коэффициента демпфирования в 3 – 4 раза, например, за счет высоковольтного резистора в нейтрали.

Если принцип контроля параметров КНП подразумевает выделение сигнала, обусловленного заданным возмущением на нейтрали, из напряжения $3U_0$, то качество выделения полезной составляющей существенно зависит от величины напряжения смещения. При малой мощности блока наложения сигнала это может приводить к дополнительной ошибке вычисления собственной частоты колебаний КНП и соответствующей ошибке в настройке системы КЕТ на резонанс.

Влияние добротности КНП

В качестве контрольного принципа проверки резонансной настройки ДГР даже в устройствах регулирования на основе измерения параметров КНП выступает амплитудный (фазовый). Если происходит отклонение максимума резонансной кривой, запускается алгоритм измерения собственной частоты КНП, призванный определить – действительно ли изменились емкостный ток и конфигурация сети. С этим связан вопрос точности настройки ДГР в сети с низкой добротностью.

В параллельном контуре часто-

та собственных колебаний не совпадает с резонансной и напряжение на нейтрали не соответствует максимуму в резонансе. Установка резисторов в нейтрали параллельно ДГР приводит к снижению коэффициента добротности Q от значений 20 – 30 до 2 – 8. Значение $3U_0$ уменьшается до единиц и долей вольт, происходит смещение максимума резонанса, которое зависит также от степени расстройки. Чем меньше соотношение между активной и емкостной составляющими тока замыкания, тем более вероятна ошибка позиционирования, т.е. точности определения «нового» максимума резонансной кривой. Выходом из этой ситуации является либо точное измерение добротности КНП, либо, что хуже, коррекция степени расстройки с помощью программного обеспечения автоматики. Как правило, при $Q > 10$ этих проблем не возникает.

Следует отметить, что добротность КНП определяется не только параметрами силовых устройств в нейтрали, но первичными параметрами сети в зависимости от ее конструкции. В частности, для распределительных воздушных сетей $Q = 50 - 100$, для кабельных – от $Q = 30 - 80$ (кабели с бумажно-пропитанной изоляцией) до $Q > 500$ (кабели с изоляцией из шитого полиэтилена). Учитывая пропорциональную зависимость напряжения на нейтрали от коэффициента добротности и напряжения естественной несимметрии, в сетях с СПЭ-кабелями можно ожидать появления $U_N > 0,15U_{\phi}$ даже при $3U_0 \ll 10$ В. Исходя из этих условий, актуальной становится задача управления добротностью КНП для поддержания коэффициента демпфирования на уровне $d = 0,15 - 0,20$ и выше в нормальном режиме эксплуатации [14].

Экспериментальная проверка точности настройки реактора

Наличие работоспособной системы управления настройкой ДГР не означает, что реактор действительно настроен в близкий к резонансу режим.

В качестве примера рассмотрим результаты экспериментальных исследований при искусственном «металли-

ческом» ОЗЗ в сети 10 кВ ПС 110/10 кВ. Нейтраль каждой секции 10 кВ заземлена через параллельно включенные реактор типа ZTC-250, оснащенный регулятором REG-DPA, и силовой резистор сопротивлением 700 Ом. Настройка REG-DPA (чувствительность по $3U_0$ в диапазоне 0,1 – 120 В, асимметрирующий конденсатор не требуется) выполнялась специалистом компании «EGE» (Чехия), а низковольтный резистор в обмотке управления 500 В так и не был задействован в системе поиска поврежденного фидера. В табл. 2 приведены полученные по результатам анализа натурных осциллограмм действующие значения 50 Гц полного тока замыкания, активной и реактивной составляющих, где I_{O33} – полный ток ОЗЗ, $I_{O33-ост}$ – остаточный ток ОЗЗ, $I_{ДГР}$ – ток реактора ZTC, $I_{O33-РЕАКТ}$ – реактивный (емкостный) ток ОЗЗ. Значения раскомпенсации для разных режимов были выставлены при регулировании тока реактора «вручную» с панели управления REG-DPA.

Как видно из последних двух столбцов табл. 2, реальная расстройка компенсации в сети отличается от отбражаемой на дисплее системы REG – DPA в 2,5–5,0 раз и более. Следовательно, необходимо контролировать качество настройки реактора не только по показаниям прибора, но и по данным записи аварийных осциллограмм. Исходя из результатов измерений и выявленных ошибок настройки КЕТ, было рекомендовано обратиться к поставщику для проверки наличия в устройстве REG DPA функции инъекции тока в нейтраль, работоспособности при $Q < 10$ и выполнить перенастройку регулятора.

Технические требования к автоматике управления режимом компенсации

Отсутствие единых требований к автоматике управления и настройке ДГР ведет к тому, что функциональная «наполненность» предлагаемых микропроцессорных систем определяется исключительно производителем и диктуется как технической целесообразностью включенных опций по количеству и точности регистрируемых па-



**Ширковец
Андрей Игоревич**

Дата рождения: 06.09.1983 г.
Окончил Новосибирский государственный технический университет (НГТУ) в 2006 г., кафедра Техники и электрофизики высоких напряжений.
В 2013 г. защитил кандидатскую диссертацию в НГТУ на тему «Исследование и моделирование электромагнитных процессов при замыканиях на землю в кабельных сетях с неэффективным заземлением нейтрали». Начальник отдела международных отношений и инжиниринга ООО «Болдид».



**Валов
Владимир Николаевич**

Дата рождения: 05.02.1993 г.
Магистрант кафедры Электрических станций Новосибирского государственного технического университета, специальность «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

Табл. 2. Сопоставление показаний REG DPA и измеренных тока реактора, тока замыкания и расстроек компенсации при осциллографировании искусственных ОЗЗ в сети 10 кВ

Режим нейтрали	Параметр	Измеренные токи ОЗЗ и ДГР на момент эксперимента, А			Показания по дисплею REG-DPA		Фактическая ν
		Полный	Активный	Реактивный	Ток ДГР, А	ν	
Комбинированная нейтраль – 1	$I_{\text{ОЗЗ-ОСТ}}$	8,60	8,27	2,36	11,3	+3,8%	+14,3%
	$I_{\text{ДГР}}$	14,11	0,57	14,09			
	$I_{\text{ОЗЗ-РЕАКТ}}$	НЕДОКОМПЕНСАЦИЯ		16,45			
Комбинированная нейтраль – 2	$I_{\text{ОЗЗ-ОСТ}}$	8,91	8,17	3,56	16,3	+49,5%	-21,7%
	$I_{\text{ДГР}}$	19,96	0,58	19,95			
	$I_{\text{ОЗЗ-РЕАКТ}}$	ПЕРЕКОМПЕНСАЦИЯ		16,39			
Комбинированная нейтраль – 3	$I_{\text{ОЗЗ-ОСТ}}$	8,24	8,20	0,84	13,8	+26,8%	+5,13%
	$I_{\text{ДГР}}$	17,21	0,44	17,20			
	$I_{\text{ОЗЗ-РЕАКТ}}$	НЕДОКОМПЕНСАЦИЯ		16,36			
Изолированная нейтраль	$I_{\text{ОЗЗ}}$	20,20	0,31	20,20	–	–	–

раметров, так и маркетинговой составляющей.

В настоящее время в ОАО «Российские сети» инициирована работа по актуализации РД 34.20.179 [15], включающая разработку новых требований к ДГР, устройствам их автоматической настройки и мерам безопасности в эксплуатации. К этой работе должны быть привлечены не только специалисты эксплуатирующих организаций, но и производители оборудования.

Выполненный анализ характеристик современных систем автоматического управления и задач поддержания резонансного режима КЕТ позволяет сформулировать наиболее важные технические требования к ним:

1. Высокая точность поддержания резонансной настройки реактора ($\pm 1 \div 5\%$) при любых изменениях конфигурации сети без устройств постоянного искусственного смещения нейтрали.

2. Возможность согласованного управления несколькими реакторами, в том числе комбинацией ступенчатых и плавнорегулируемых, на разных секциях шин при включении и отключении межсекционных выключателей.

3. Правильное функционирование в различных режимах эксплуатации: нормальном, неполнофазном, при металлических и дуговых ОЗЗ, в том числе через высокое переходное сопротивление.

4. Устойчивая работа и автоматическая

перенастройка в сетях с высокими значениями напряжения естественной несимметрии, изменяющейся фазой и амплитудой этого напряжения, в сетях с низкой добротностью (менее 10).

5. Наличие функции селективного ОПФ, устойчиво работающего независимо от вида ОЗЗ и параметров КНП. Возможность управления активным током для организации селективного действия ненаправленных релейных защит от ОЗЗ.

6. Измерение и непрерывная регистрация параметров сети (фазной емкости изоляции и индуктивности ДГР, собственной частоты колебаний КНП, добротности сети), величины и знака степени расстройки за длительный период времени, передача текущих и накопленных данных в систему телемеханики.

7. Ведение журнала событий и аварийный осциллограф: возможность регистрировать набор параметров ОЗЗ: фазные напряжения, ток реактора, напряжение $3U_0$; дату и время возникновения и завершения замыкания.

Полезным для правильного ведения режима КЕТ представляется набор функций по определению механических параметров плунжерного ДГР (реализованных, например, в системе УАРК-105) для повышения точности регулирования, в том числе: управление частотным преобразователем питания приводного электродвигателя ДГР [16], учет механических характеристик



Петров

Михаил Иванович

Дата рождения 07.10.1956 г.

Окончил Чувашский государственный университет имени

И.Н. Ульянова в 1979 г., кафедра Электроснабжения промышленных предприятий (ЭСПП).

В 1994 г. защитил в Московском энергетическом институте кандидатскую диссертацию на тему «Совершенствование средств компенсации емкостных токов замыкания на землю».

Доцент кафедры ЭСПП. Технический директор ООО ВП «ПРОЦИОН».

Технический директор ООО ВП «ПРОЦИОН».

Технический директор

ООО ВП «ПРОЦИОН».

при известной кинематической схеме реактора, учет времени и скорости разгона привода реактора, учет изменения динамических параметров привода и автоматическое измерение его инерции при настройке.

Качество управления режимом компенсации тока замыкания в нормальном режиме можно существенно повысить за счет регулирования добротности КНП, а в режиме длительно-го удержания однофазного повреждения в сети – за счет перенастройки реактора специальной конструкции с помощью дополнительной обмотки с частичным подмагничиванием. Для этого необходимы разработка и внедрение новых конструкций силовых дугогасящих аппаратов и апробация алгоритмов управления ими.

Выводы

1. Применяемые в эксплуатации системы автоматического управления режимом компенсации выполняют регулирование тока ДГР до (плунжерные и статические реакторы) или после (реакторы с подмагничиванием) возникновения замыкания на землю. Формирование управляющего сигнала происходит по результатам измерения амплитудных и фазовых характеристик напряжения на нейтрали или первичных параметров КНП. Максимальная эффективность КЕТ предполагает необходимость использования обоих принципов.

2. Наиболее устойчивыми к изменениям конфигурации и нагрузки сети являются методы управления ДГР, основанные на определении параметров КНП путем кратковременного возбуждения нейтрали на непромышленной частоте. Они не требуют дополнительного смещения нейтрали с поддержанием постоянной несимметрии фазных напряжений.

3. Повышение точности настройки управляемых реакторов с 5% до 1% связано с объективными сложностями, особенно в диапазоне малых токов компенсации, и требует учета и автоматической коррекции ряда параметров, отличающихся для разных конструкций ДГР и принципов их регулирования.

4. Предложенные технические требования к автоматике управления режимом компенсации предусматривают ее устойчивую работу и настройку реактора в режим, близкий к резонансу, независимо от конфигурации и конструкции сети. В сетях, не оснащенных селективными устройствами релейных защит от ОЗЗ, целесообразно дополнение автоматики терминалом определения поврежденного фидера.

Литература

1. Правила устройства электроустановок, 7 изд., утв. Приказом Минэнерго России от 08.07.2002 №204.
2. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации РД 34.20.501-95, утв. Приказом Минэнерго России от 19.06.03 г.
3. Петров О.А. О допустимой расстройке компенсации в электрических сетях 6-35 кВ /О.А. Петров, А.И. Левковский // Электрические станции. – 1992. – №1. – С.71 – 75.
4. Компенсация емкостного тока – путь к снижению аварийности сетей 6-10 кВ. Опыт эксплуатации в сетях металлургического комбината // Промышленное оборудование. – 2011. - №4(67). – С.12-13.
5. Долгополов А.Г. Способы автоматической настройки дугогасящих реакторов с подмагничиванием // Электротехника. – 2003. – №1. – С. 59-63.
6. Ширковец А.И. Экспериментальное исследование эффективности дугогасящего реактора РУОМ при «металлических» и дуговых однофазных замыканиях на землю в сети 10 кВ / А.И. Ширковец, М.В. Ильиных, И.Н. Дмитриев, С.О. Астафьев, А.И. Ильин, В.Н. Сазонов, Д.В. Багаев // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2009. – №3 – С. 17-26.
7. Обабков В.К. Об эффективности дугогасящих реакторов, систем автоматической настройки компенсации и земляных защит при однофазных замыканиях на землю / В.К. Обабков, Ю.Н. Целуевский // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2001. – № 3 – С.17-21.
8. Маврицын А.М., Петров О.А. Электроснабжение угольных разрезов. – М.: Недра, 1977. – 184 с.
9. Козлов В.Н. О способах выполнения автоматики управления ДГР / В.Н. Козлов, М.И. Петров, И.В. Соловьев // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – №3(08). – С. 14-19.
10. Соловьев И.В. Метод автоматического управления плунжерными дугогасящими реакторами / И.В. Соловьев, В.С. Петров, М.И. Петров // Вестник Чувашского университета. – 2010. – № 3. – С. 251-259.
11. Druml, Gernot. Дугогасящие реакторы 6–35 кВ. Новый метод определения параметров сети / Gernot Druml, Andreas Kugi, Bodo Parr // Новости ЭлектроТехники. – 2007. – № 2(44). – С. 61-64.
12. Вайнштейн Р.А. Контроль настройки дугогасящих реакторов в электрических сетях 6-35 кВ/ Р.А. Вайнштейн, В.В. Шестакова, С.Н. Пашковский, С.М. Юдин, А.Н. Сербулов // Известия Томского политехнического университета. Техника и технологии в энергетике. – 2014. – Т. 325. – № 4. – С.149-154.
13. Пат. 2222857 Российская Федерация, МПК H02J3/18. Способ автоматической настройки дугогасящего реактора / А.Г.Долгополов; заявитель и патентообладатель А.Г.Долгополов. – № 2002112895/09; заявл. 17.05.2002; опубл. 27.01.2004, Бюл. №3.
14. Системы компенсации емкостных токов замыкания на землю с шкафами «ПРОЦИОН ШЭА 100Х. РЭ. Чебоксары, 2014. – 16 с.
15. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ. РД 34.20.179 (ТИ 34-70-070-87).
16. Гусарин В.Ю. К проблеме повышения точности настройки дугогасящих реакторов / В.Ю. Гусарин, М.И. Петров // Известия вузов. Электромеханика. – 2008. – Спец. Выпуск. – С.85-86.