

Авторы:
Козлов В.Н.,
Петров М.И.,
Соловьев И.В.,

ООО «НПП Бреслер»,
 г. Чебоксары, Россия.

Kozlov V.N., Petrov M.I.,
Solovyev I.V.,
 LLC «NPP Bresler»,
 Cheboksary, Russia.

О СПОСОБАХ ВЫПОЛНЕНИЯ АВТОМАТИКИ УПРАВЛЕНИЯ ДГР

УДК 621.316

ABOUT HOW TO PERFORM AUTOMATIC CONTROL ARC SUPPRESSION COILS

Аннотация: рассмотрены способы выполнения автоматки управления дугогасящими реакторами, внедренные в электрических сетях России в разное время.

Ключевые слова: компенсация емкостных токов, контур нулевой последовательности, автоматика управления ДГР, способ настройки, дополнительный источник, расстройка, свободные колебания, инжекция тока.

Abstract:

The methods of implementation of the automatic control arc suppression coils are embedded in networks of Russia at various times.

Keywords:

Compensation of capacitive currents, circuit zero of sequence network. Automatic control of the ASR, setup method, additional source, detuning, free oscillations, injection current.

Компенсация емкостного тока в сетях с изолированной нейтралью с помощью дугогасящих реакторов (ДГР) – основной способ сохранения их в работе при возникновении замыканий на землю [1].

Степень компенсации емкостного тока принято оценивать величиной, называемой расстройкой компенсации

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

где I_C – суммарный емкостной ток сети, I_L – компенсирующий ток ДГР. Задача автоматки – поддерживать как можно меньший уровень расстройки при изменении параметров сети.

В настоящее время в серийных устройствах автоматки управления ДГР используются четыре основных способа определения расстройки компенсации емкостного тока (контра нулевой последовательности) сети. Два «пассивных» способа, основанных на резонансной характеристике контра нулевой последовательности КНП – достижение напряжением нулевой последовательности на нейтрали сети U_N максимума при резонансе и изменении угла этого напряжения относительно опорного сигнала. А также два «активных» способа, основанных на постороннем воздействии на КНП сети и оценке ее реакции. В первом случае на сеть накладывается сигнал заранее известной частоты, во втором – импульсный сигнал произвольной формы.

Экстремальный способ настройки ДГР

На рис. 1 приведены типичные резонансные кривые зависимости напряжения на нейтрали сети от величины расстройки при различных добротностях КНП.

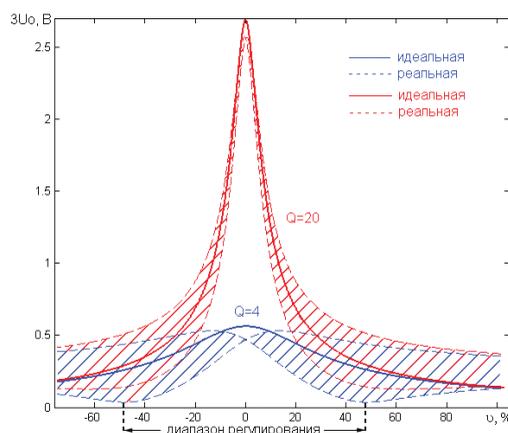


Рис. 1. Амплитудная характеристика КНП

Задача автоматки – поддержание настройки на максимуме резонансной кривой или на ее заданной точке при изменении параметров (конфигурации) сети. Для высокодобротных сетей, при небольших уровнях расстройки, задача не представляется сложной. Основным очевидным недостатком является необходимость постоянного манипулирования ДГР при изменениях (колебаниях) контролируемого напряжения U_N . Однако наиболее распространенные плунжерные ДГР, изменение индуктивности которых осуществляется за счет механического изменения зазора магнитопровода, имеют незначительный ресурс механической части и допускают лишь несколько включений привода в сутки. В то же время изменения U_N чаще всего связаны с изменением нагрузки сети, а не ее конфигурации.



Как результат, автоматика, построенная по данному принципу, быстро выводит из строя механическую часть ДГР. Одного этого недостатка достаточно, чтобы использовать другие принципы настройки ДГР.

Кроме вышесказанного существует еще целый ряд проблем, обусловленных использованием напряжения на нейтрали сети U_N в качестве основного контролируемого параметра. Это напряжение образуется как сумма напряжений различных «небалансов» в сети, основные из них приведены на рис. 2. Величины «небалансов» различны для различных сетей, нестабильны, многие

имеют частоты, отличные от частоты сети, и не синхронизированы с ней. В результате оказывается, что естественное напряжение небаланса имеет значительную непредсказуемую часть, которая постоянно меняется (рис. 3).

Для борьбы с влиянием нестабильной части U_N используется искусственное смещение напряжения на нейтрали сети [2]. Чем оно выше, тем меньше сказывается нестабильная часть. ПУЭ [3] [п. 2.5.96] допускает смещение нейтрали до 15% фазного напряжения. Тем самым констатируется факт, что еще встречаются несимметричные (как правило воздушные) линии, кото-

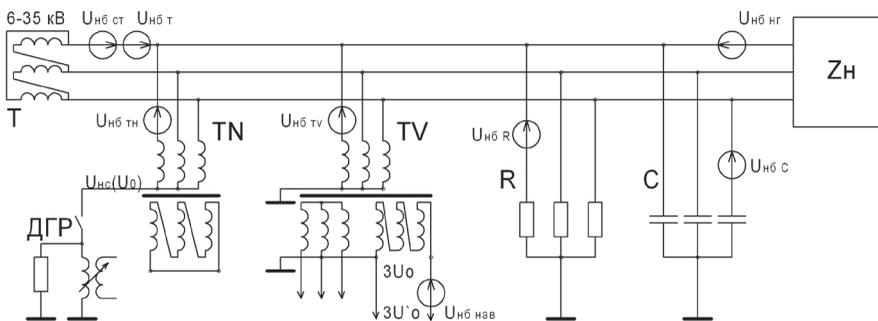
рые требуется эксплуатировать. Однако любая несимметрия сети приводит к появлению блуждающих токов в земле и электрохимической коррозии ее элементов (ПУЭ п. 2.3.101). Для кабелей это в первую очередь разрушение защитной оболочки. Идеальная сеть должна иметь нулевое значение U_N .

Еще одна проблема, связанная с напряжением на нейтрали U_N – ее реальная величина. Даже для высокодобротных сетей величина $3U_0$, пропорциональная U_N , при резонансе составляет: воздушные линии – единицы вольт; кабельные – сотни мВ; современные кабельные из сшитого полиэтилена – десятки мВ. Современные способы комбинированного заземления нейтрали [4], старение изоляции и т.д. приводят к уменьшению добротности сетей до величин 2...6. В итоге изменения напряжения при изменении расстройки сети резко уменьшаются, и автоматика оказывается неспособной четко определить точку резонанса (рис. 1).

Теоретически резонансная кривая должна иметь монотонный спад по обе стороны от точки резонанса – сплошная линия на рис. 1. Однако практически (с учетом влияния небаланса) нестабильная часть U_N , при значительной расстройке компенсации, приводит к некоторому росту напряжения – пунктирная линия на рис. 1. В результате автоматика реально способна адекватно работать лишь в узком диапазоне расстройки компенсации. Выход расстройки за данный диапазон приводит к неправильной работе автоматики, «загоняющей» ДГР на крайние режимы компенсации и дальнейшему ее отказу.

Фазовый способ настройки ДГР

Фазовый способ определения расстройки компенсации емкостного тока основан на фазовой характеристике резонансного контура (рис. 4). Контролируемым параметром является угол между напряжением на нейтрали сети и опорным вектором. В качестве последнего могут выступать различные величины. В условиях резко переменных нагрузок – дуговые печи, работа мощного прессового оборудования и т.д. – стабильность угла напряжения U_N значи-



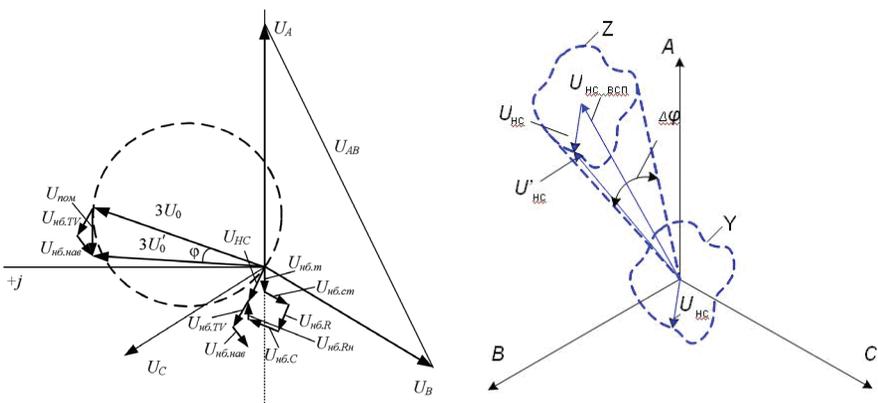
$U_{нс}$ – напряжение несимметрии, обусловленное небалансом:

- $U_{нб.т}$ – силового трансформатора,
- $U_{нб.ст}$ – сети высшего уровня,
- $U_{нб.р}$ – утечек изоляции,
- $U_{нб.рн}$ – нагрузки,

$U_{нб.с}$ – емкостной проводимости,

- $U_{нб.тв}$ – измерительного трансформатора,
- $U_{нб.нав}$ – наведенных ЭДС,
- $U_{пом}$ – напряжения помехи, представленное: $U_{нб.тв}$ и $U_{нб.нав}$.

Рис. 2. Основные источники, формирующие напряжение несимметрии U_N



а) формирование области нестабильности

б) смещение нейтрали

Рис. 3. Область нестабильности напряжения U_N

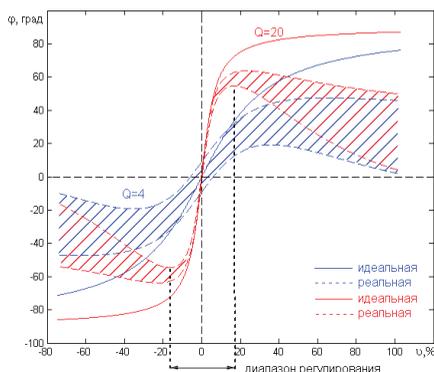


Рис. 4. Фазовая характеристика КНП

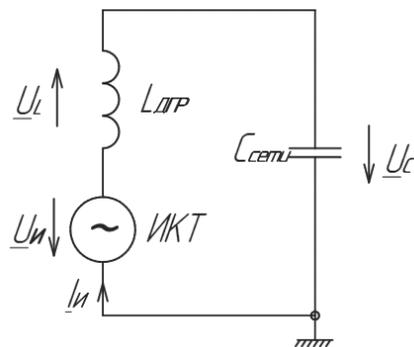


Рис. 5. Схема замещения сети для ИКТ

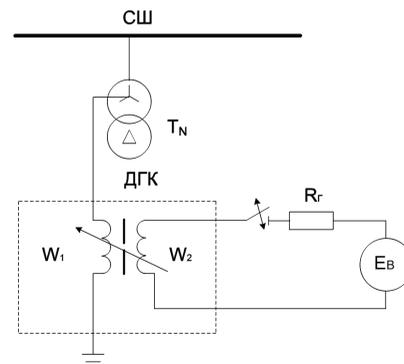


Рис. 6. Принцип инжекции тока в измерительную обмотку ДГР

тельно выше, чем ее величины. Поэтому фазовый способ определения расстройки предпочтительнее экстремального.

Контролируемым параметром по-прежнему остается напряжение U_N на нейтрали сети со всеми вышеописанными недостатками, ему присущими. При малых значениях напряжения U_N ее нестабильная часть оказывает на угол даже большее влияние, чем на величину. Поэтому фазовый способ используется исключительно совместно с искусственным смещением нейтрали сети [2] со всеми его недостатками. На рис. 4 приведена идеальная и реальная (с учетом влияния небаланса) фазовые характеристики, из которых видно, что зона правильного определения расстройки такого регулятора невелика. Выход за пределы этой зоны приводит к такому же неадекватному поведению фазового регулятора, как и построено по экстремальному принципу.

Описанные способы, благодаря относительной простоте их реализации, используются в автоматических регуляторах REG-DPA, МИРК, УАРК. Однако вышерассмотренные недостатки со всей очевидностью свидетельствуют, что для определения расстройки компенсации необходимо использовать другие способы. Такую возможность дает активное воздействие на контур нулевой последовательности сети.

Способ определения расстройки компенсации с помощью дополнительного источника

Способ базируется на введении

в контур нулевой последовательности сети контрольного источника тока (ИКТ), который имеет заранее известную частоту [5, 6] или форму [7].

Источник контрольного тока включается последовательно с ДГР. Схема замещения контура нулевой последовательности сети для этого источника, без учета активного сопротивления и собственной индуктивности, имеет вид рис. 5. Из схемы можно записать

$$U_L = \frac{U_H}{\frac{1}{\omega_H^2 LC} - 1}, \quad (2)$$

где ω_H – круговая частота напряжения источника ИКТ, L и C – соответственно индуктивность ДГР и емкость сети.

Выразив емкостный ток сети $I_C = U_N \omega_C C$ и ток ДГР $I_L = U_N / \omega_C L$ через напряжение на нейтрали сети U_N , где ω_C – круговая частота сети, можно привести (1) к виду

$$v = 1 - \frac{1}{\omega_C^2 LC}. \quad (3)$$

Введя обозначение $\omega_C = k \omega_H$ и решив (2) и (3) совместно, получим

$$v = \frac{U_L(k^2 - 1) - U_H}{k^2 U_L}.$$

Последняя формула позволяет определить расстройку компенсации для ИКТ любой частоты, измерив величины напряжений на ДГР и ИКТ.

В качестве ИКТ обычно используется трансформатор, первичная обмотка которого включается последовательно с ДГР, а во вторичную – осуществляется инжекция тока [6]. Форма инжектируемого

тока имеет существенное значение. Желательно, чтобы ток не имел дополнительных гармонических составляющих, кроме того, он не должен содержать постоянной составляющей приводящих к насыщению электромагнитных элементов сети. Для выделения накладываемого сигнала приходится применять специальные фильтры.

Реально выпускается устройство ИРК-5А, в котором используется специальный мощный постоянно действующий ИКТ, имеющий частоту 25 Гц [6]. Дополнительно такое устройство позволяет выполнять поиск поврежденного фидера при замыканиях на землю в сети или однофазных замыканий на землю в генераторах при установке ИКТ в нейтраль последних.

Основными недостатками данного способа определения расстройки компенсации являются проблемы с ИКТ, который входит в контур нулевой последовательности сети, и его параметры должны учитываться. ИКТ должен иметь достаточную мощность, чтобы накладываемый им сигнал можно было с достаточной точностью измерить на фоне собственного шума в КНП и дополнительных гармоник, создаваемых самим ИКТ. Да и насыщение сети дополнительными гармониками нельзя считать положительным фактором.

Определение расстройки компенсации по частоте свободных колебаний КНП

Из курса ТОЭ [8] известно, что частота свободных колебаний RLC конту-

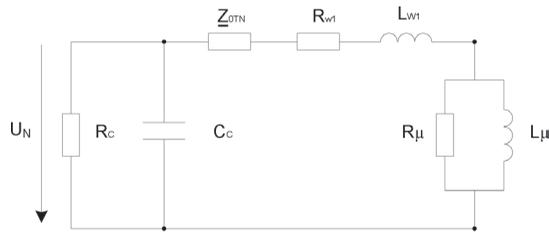


Рис. 7. Схема замещения сети при воздействии источника возмущения E_B

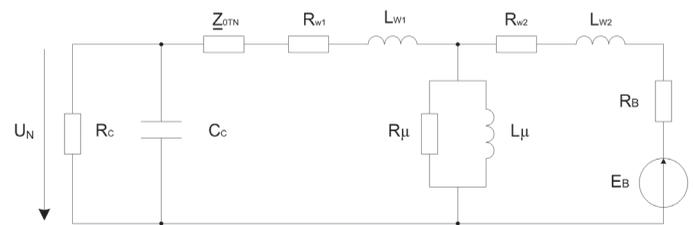


Рис. 8. Схема замещения сети при отсутствии источника возмущения

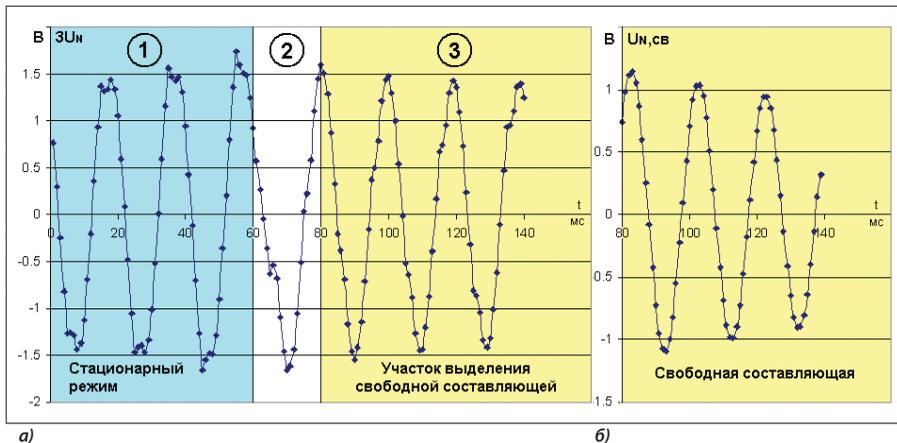


Рис. 9. Осциллограмма напряжения $3U_N$ на нейтрали сети

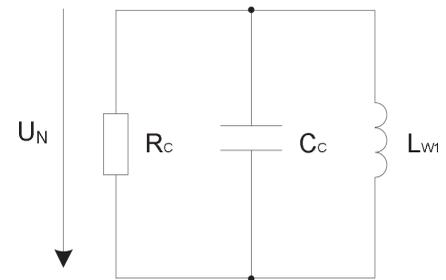


Рис. 10. Расчетная схема замещения сети для участка 3 осциллограммы рис. 9,а

ра зависит только от параметров элементов этого контура. Чтобы вызвать колебания в контур, нужно внести возмущение – изменить энергию одного из реактивных элементов. Возврат к равновесному состоянию (выравниванию энергии между L и C) происходит аperiodическим или колебательным образом, что определяется сопротивлением R контура. В КНП электрических сетей переходной процесс, при наличии ДГР, носит колебательный характер.

Естественным образом свободные колебания в КНП сети возникают в момент короткого замыкания провода на землю. Эти колебания имеют большую интенсивность, и их легко выделить. Есть свидетельства, что еще в 70-е годы частота этих колебаний использовалась Лихачевым Ф.А. [9] для определения правильности настройки КНП в резонанс.

Для построения автоматики управления ДГР необходимо уметь ис-

кусственно вызывать и выделять свободные колебания в КНП. Возмущение в КНП можно создать аналогично предыдущему способу с помощью ИКТ. Основное отличие заключается в том, что нет необходимости в постоянном действии ИКТ, так как колебания возникают в момент начала возмущения и далее быстро затухают. Поэтому ИКТ может быть импульсным, причем форма сигнала не играет роли, а вносимая им энергия определяет только интенсивность колебаний.

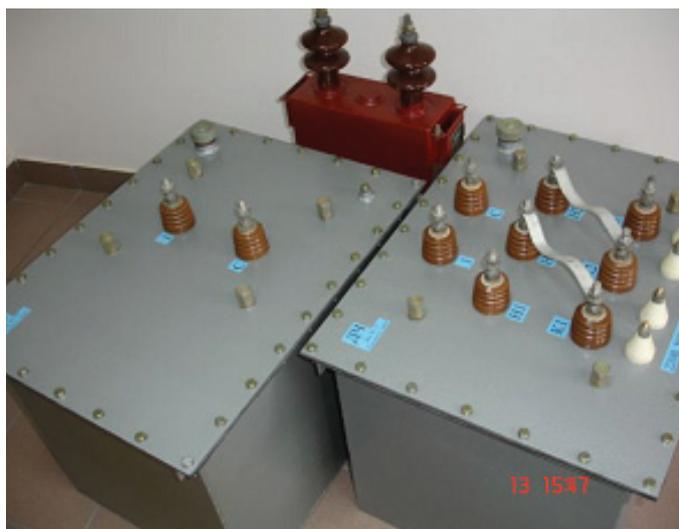
Проще всего внести возмущение в КНП через измерительную обмотку ДГР (рис. 6). Импульсный источник вызывает свободные колебания дважды – как в момент начала своего действия, так и в момент окончания. Схема замещения КНП при действии источника возмущения приведена на рис. 7, а при его отсутствии – на рис. 8. Очевидно, что последняя схема проще, в ней отсутствуют элементы цепи возмущения и, следовательно, параметры измерительной обмотки ДГР.

Основная задача – выделить из напряжения нулевой последовательности свободные колебания [10, 11]. На рис. 9,а приведена осциллограмма U_N , снятая при работе автоматическим регулятором ДГР «Бреслер-0107.060». Осциллограмма разбита на три участка: 1 – до момента инъекции тока; 2 – в момент инъекции тока; 3 – после прекращения действия источника. Визуально трудно найти различия кривой U_N на этих участках, т.е. инжестируемый ток невелик и не приводит к заметному изменению напряжения на нейтрали сети. Тем не менее применение современных методов обработки сигналов позволяет совместить осциллограммы 1-го и 3-го участков и найти разностный сигнал (рис. 9,б) который и является напряжением свободных колебаний – $U_{N,св}$.

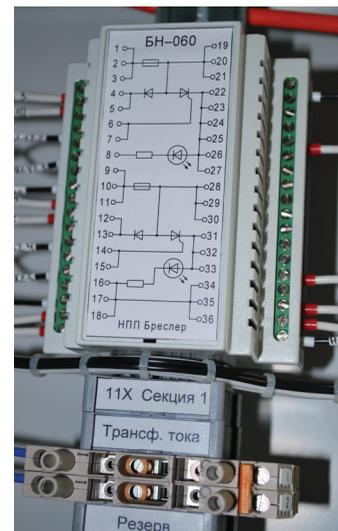
Из решения дифференциального уравнения для схемы замещения сети после прекращения действия возмущающего импульса (рис. 10) можно получить выражение для свободной состав-



Козлов Владимир Николаевич
 Дата рождения: 15.08.1952 г.
 Окончил Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова в 1975 г., кафедра «Электрические аппараты». В 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию в Ленинградском политехническом институте на тему «Комплексная защита судовых генераторов». Доцент каф. «ТОЭРЗА» Чувашского госуниверситета, главный конструктор ООО «НПП Бреслер».



ИРК-5А
Рис. 11. Сравнительные размеры ИКТ устройств



Бреслер-0117.60

ляющей напряжения на нейтрали сети в виде

$$u_{н,св} = U_0 e^{-\alpha t} \sin(\omega_{св} t + \theta),$$

где величины U_0 и θ определяются состоянием схемы в момент прекращения инжекции тока. Частота $\omega_{св}$ и коэффициент затухания α свободных колебаний определяются корнями характеристического уравнения

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2RC} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 - \frac{1}{LC}} = -\alpha \pm j\omega_{св},$$

соответствующего дифференциальному уравнению, описывающему схему (рис. 8).

Следовательно

$$\omega_{св} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \alpha^2} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}, \text{ а } \omega_0 = \sqrt{\omega_{св}^2 + \alpha^2}, \quad (4)$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ – резонансная частота идеального (без потерь) резонансного контура.

Выражение (1) можно преобразовать к виду, характеризующему влияние частоты на величину расстройки:

$$\nu = \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega_c^2}\right) \times 100\%. \quad (5)$$

Величина затухания контура легко определяется [8] как

$$\alpha = \frac{\ln \frac{U_1}{U_2}}{T_{св}},$$

где напряжения U_1 и U_2 берутся из кривой рис. 9,б через интервал времени, равный периоду свободных колебаний $T_{св}$.

Обычно U_N измеряется с помощью специального трансформатора напряжения – TV на

рис. 2. Однако, поскольку для вычисления расстройки используется только частота и коэффициент затухания свободных колебаний, они могут быть определены не обязательно из этого напряжения, а, например, из тока ДГР или напряжения на его измерительной обмотке. Последнее может быть использовано для упрощения автоматики ДГР и повышения надежности устройства.

Основными достоинствами метода определения расстройки компенсации по частоте свободных колебаний КНП следует считать:

- корректная работа как в высокодобротных сетях, так и в сетях с низкой добротностью, в том числе обусловленной комбинированным заземлением нейтрали;
- корректная работа в высокосимметричных сетях с практически нулевым смещением нейтрали;
- отсутствие необходимости в дополнительном смещении нейтрали сети, соответственно, и связанных с этим неприятностей и проблем;
- отсутствие излишних включений привода ДГР, не обусловленных реальным изменением конфигурации сети;
- возможность определения частоты свободных колебаний непосредственно из напряжения на измерительной обмотке ДГР.

В настоящее время в эксплуатации находится около 300 устройств автоматического управления плунжерными ДГР типа «Бреслер-0107.060» [12]. Устройство используется практически со всеми типами реакторов и раз-



Петров

Михаил Иванович

Дата рождения 07.10.1956 г. Окончил Чувашский государственный университет в 1979 г., кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭсПП). Защитил в 1994 г. в МЭИ диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Совершенствование средств компенсации емкостных токов замыкания на землю». Главный специалист по режимам нейтрали ООО «НПП Бреслер».



Соловьёв

Игорь Валерьевич

Дата рождения 21.10.1984 г. В 2007 г. окончил Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, кафедра вычислительной техники. Инженер ООО «НПП Бреслер».

личными видами заземления нейтрали, имеющимися в России и странах СНГ.

Современные цифровые способы обработки информации позволили отказаться от мощного ИКТ. Для сравнения на рис. 11 приведены габариты ИКТ устройства ИРК-5А и блока инжекции тока устройства «Бреслер-0107.060». Первый представляет собой силовое маслонаполненное оборудование весом десятки кг [13], второе – небольшое устройство весом 300 грамм, размещаемое на DIN-рейке шкафа автоматики [12].

Микропроцессорная реализация устройства дополнительно обеспечивает:

- совместное использование ИКТ как для задачи автоматизации управления ДГР, так и для поиска поврежденного фидера;
- ведение журнала событий, в котором фиксируется дата и время изменения емкостного тока сети, новые значения величины этого тока и расстройки компенсации;
- периодический мониторинг добротности сети с сохранением результатов, позволяющий косвенно судить о состоянии изоляции сети;
- диагностику привода плунжера ДГР без разборки его механической части;
- удаленный доступ к автоматике с возможностью изменения режимов ее работы и передачи имеющейся информации.

Выводы

1. Из рассмотренных способов определения расстройки компенсации емкостного тока наиболее перспективным является способ, основанный на контроле частоты свободных колебаний контура нулевой последовательности сети.

2. Использование последнего способа в совокупности с его микропроцессорной реализацией и современными способами обработки информации позволило получить ранее не достижимые характеристики и функции устройства автоматического управления ДГР.

Литература:

1. Petersen W., Neutralizing of ground fault current and suppression of ground fault arcs through the ground fault reactor, E.T.Z., 1919.
2. Миронов И. Дугогасящие реакторы 6–35 кВ. Автоматическая компенсация емкостного тока // Новости ЭлектроТехники. – 2007. – № 3(45). – С. 62–65.
3. Правила устройства электроустановок. Издание 7-е. Утверждено Приказом Минэнерго РФ от 08.07.2002.
4. Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Режимы заземления нейтрали в электрических системах: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 118 с.
5. Миронов И. Дугогасящие реакторы 6–35 кВ. Автоматическая компенсация емкостного тока // Новости ЭлектроТехники. – 2007. – № 5(47). – С. 56–59.
6. Головко С.И., Потапов П.Н. Измерение расстройки компенсации в сетях 6 – 35 кВ // Электрические станции. – 2003. - №9. - С. 59-65.
7. Druml G., Seifert O. Дугогасящие реакторы 6–35 кВ. Новый метод определения параметров сети // Новости ЭлектроТехники. – 2007. – № 2(44). – С. 61–64.
8. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники: В 3-х ч. Ч.1. Линейные электрические цепи. Учебник для вузов. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 592 с. ил.
9. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971, – 152 с. с илл.
10. Патент РФ №2321132. Способ настройки компенсации емкостных токов замыкания на землю в электрических сетях/В.Ф. Ильин, М.И. Петров, И.В. Соловьев.- Оpubл. в Б.И. №9, 2008.
11. Козлов В.Н., Петров М.И. Дугогасящие катушки и автоматика управления ими./ Релейная защита и автоматизация. – 2010. - №01(00). – С. 20-25.
12. <http://www.bresler.ru>.