

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

СТАЦИИ

ISSN 0201-4564

2013 6

АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Обоснование эффективности новой технологии выведения нерастворённых примесей из парогенераторов АЭС с водой продувки

ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Пусковые схемы отечественных блоков ПГУ на базе газотурбинных установок ГТУ-160

Нормализация перемещений турбин от действия усилий, передаваемых трубопроводами на лапы цилиндров

Определение ресурса металла новых рабочих лопаток из никелевого сплава ЭП800-ВД

Система оптимизации распределения нагрузок между основным оборудованием Минской ТЭЦ-4 и расчёта её эквивалентной энергетической характеристики

ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

Эффективность суточного регулирования нагрузки на рынке электроэнергии

Обеспечение прохождения периода ночного минимума электропотребления ОЭС Центра с учётом ввода мощностей АЭС

Стабилизация напряжения сети управляемыми подмагничиванием реакторами и конденсаторными батареями

Определение места однофазного замыкания на землю в сетях 6 – 35 кВ при помощи искусственных нейронных сетей

ХРОНИКА

Новости электротехнических и электроэнергетических компаний



Стабилизация напряжения сети управляемыми подмагничиванием реакторами и конденсаторными батареями

- **Брянцев А. М.**, доктор техн. наук, ООО “Электросетевые компенсаторы” (ООО “ЭСКО”)
- **Базылев Б. И.**, канд. техн. наук, ООО “Электросетевые компенсаторы”
- **Лурье А. И.**¹, канд. техн. наук, г. Москва
- **Райченко М. О.**, ООО “СКРМ”
- **Смоловик С. В.**, доктор техн. наук, ОАО “НТЦ ЕЭС”

Резерв регулируемой реактивной мощности может быть обеспечен установкой в узлах электрической сети управляемых источников с управляемыми подмагничиванием шунтирующими реакторами и коммутируемыми конденсаторными батареями. Их параметры необходимо выбирать по условию равенства напряжения центров питания и узлов нагрузок в установившихся режимах, таким образом стабилизировать напряжение в электрических сетях во всех режимах нагрузки, повышать пропускную способность линий и снижать потери.

Ключевые слова: реактивная мощность, источник реактивной мощности, управляемый подмагничиванием шунтирующий реактор, батарея статических конденсаторов.

В силовой электротехнике применение управляемых подмагничиванием реакторов (УР) началось с создания мощных магнитных усилителей и дугогасящих реакторов. По проблеме создания УР для энергетики в нашей стране и за рубежом более полувека проводились научные исследования, разрабатывались модели, макеты, опытные образцы. По ряду причин, прежде всего из-за относительно сложной конструкции и низких технико-экономических показателей, эти УР не нашли широкого применения в электрических сетях.

Улучшение технико-экономических показателей было достигнуто в результате использования в

УР сильного насыщения магнитной цепи реактора в номинальном режиме, когда рабочая точка магнитного потока порядка половины периода частоты питающей сети находится в области насыщения стали при индукции более 2 Тл [1]. Важный этап – это создание опытно-промышленного образца однофазного шунтирующего УР (УШР) типа РОДУ-60000/500 мощностью 60 Мвар для ВЛ 500 кВ. Одна фаза УШР была изготовлена и всесторонне испытана на Запорожском трансформаторном заводе, а затем на сетевом стенде подстанции 500 кВ Белый Раст ПО “Дальние электропередачи” (1989 г.). В процессе работы над созданием УШР 500 кВ была обоснована и успешно подтверждена возможность работы мощных реакторов в зоне индукции, существенно превышающей индукцию насыщения стали. Применён ряд оригинальных научных и защищённых патентами инженерно-технологических решений [1]. Впервые удалось успешно выпустить мощный высоковольтный реактор принципиально новой конструкции без промежуточного полномасштабного макета (как это делалось до тех пор). Впервые удалось преодолеть психологический барьер использования электротехнической стали с рабочей точкой существенно выше 2 Тл. Этот УШР был подготовлен для массового производства, но из-за ряда трудностей того времени не был внедрён в эксплуатацию.

В конце прошлого века возникла потребность стабилизации напряжения в отдалённых узлах нагрузки, в том числе на разработках полезных ископаемых в Сибири и на Крайнем Севере. В 1997 г. был изготовлен головной промышленный образец УШР типа РТУ-25000/110-У1 (рис. 1). В 1998 г.

¹ Лурье Александр Иосифович: luriea@mail.ru



Рис. 1. Шунтирующий реактор, управляемый подмагничиванием, типа РТУ-25000/110 на подстанции Кудымкар “Пермэнерго” (включён в эксплуатацию в сентябре 1999 г.)



а)



б)

Рис. 2. УШР типа РТУ-180000/330 на подстанции Барановичи, 2002 г. (а) и на ОРУ 330 кВ Игналинской АЭС, 2008 г. (б)

реактор прошёл комплексные испытания и последующую опытно-промышленную эксплуатацию на мощном испытательном стенде НТЦ ВЭИ в г. Тольятти. В мае 1999 г. реактор был отправлен в Северные электрические сети “Пермэнерго” и смонтирован на головной ПС 110 кВ Кудымкар, а в сентябре 1999 г. после проведения пусконаладочных работ введён в эксплуатацию совместно с существующей батареей статических конденсаторов (БСК) мощностью 52 Мвар. Опыт успешной первой промышленной эксплуатации УШР 110 кВ, 25000 кВ·А на ПС Кудымкар “Пермэнерго” к 2012 г. уже составляет более 12 лет [1].

В последнее десятилетие возникла потребность в регулируемых источниках реактивной мощности (ИРМ) на базе УШР, устанавливаемых на ПС 220 – 330 – 500 кВ. Были разработаны и введены в эксплуатацию УШР типа РТУ мощностью 100 Мвар, 220 кВ и 180 Мвар, 330 кВ (рис. 2), а также трёхфазные группы 180 Мвар, 500 кВ (рис. 3).

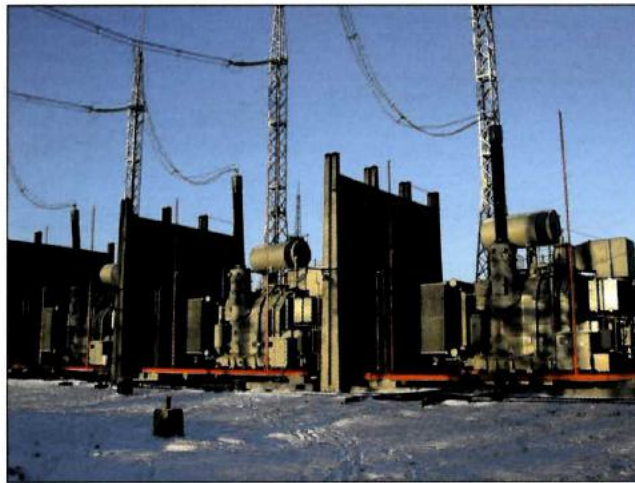


Рис. 3. Трёхфазная группа УШР типа РТУ-180000/500 на подстанции 500 кВ Таврическая, Новосибирск, 2005 г.

На серию реакторов РТУ в установленном порядке разработаны, согласованы, утверждены и впервые с 16.04.2004 г. введены в действие технические условия ТУ 3411-001-53950285-2004 “Реакторы управляемые трёхфазные масляные тип РТУ мощностью от 32 000 до 180 000 квар классов напряжения 110, 220, 330 и 500 кВ”. В настоящее время ассортимент выпускаемых УШР расширен и включает в себя следующее оборудование для автоматических систем стабилизации напряжения:

УШР 6, 10, 35 кВ мощностью 3,6, 10, 16 и 25 Мвар для электрических сетей с изолированной нейтралью (УШР 6 – 35 кВ);

УШР 110, 220, 330, 500 кВ мощностью 25, 63, 100 и 180 Мвар для электрических сетей с заземлённой нейтралью (УШР 110 – 500 кВ);

ИРМ 6 – 500 кВ на базе УШР и БСК, с диапазоном мощностей от $\pm 3,6$ до ± 180 Мвар (ИРМ 6 – 500 кВ).

К началу 2012 г. в эксплуатации в сетях 35 – 110 – 220 – 330 – 500 кВ и в производстве насчитывается уже более 60 УШР мощностью 10 – 180 Мвар, в том числе более 30 УШР класса напряжения 220 – 500 кВ. Объём поставок оборудования по проектам с использованием технических решений ООО “ЭСКО” только в электрических сетях России и стран СНГ за последние три года составил более 5 Гвар. Далее приведены данные об автоматических системах стабилизации напряжения на базе УШР и ИРМ, работающих в России и других странах.

Страна	Число, шт.	Установленная мощность, Гвар
Российская Федерация	47	3,638
Республика Казахстан	9	1,23
Республика Беларусь	2	0,36
Литовская республика	1	0,18
Всего	59	5,41



Рис. 4. Источник реактивной мощности на базе УШРТ типа РТМУ-10000/35-УХЛ1 (ПС Ванкор, 2011 г.)

Однако это лишь незначительная часть общей потребности в УШР и ИРМ, которая на текущий момент по различным оценкам в России и странах СНГ достигает 40 – 50 Гвар, а благодаря активному освоению FACTS-технологий и развитию интеллектуальных сетей уже в ближайшие годы должна увеличиться в несколько раз [1 – 5].

УШР и ИРМ на их основе эксплуатируют: ОАО “ФСК ЕЭС”, ОАО “КЕГСОС”, АО “Lietuvos Energija”, ОАО “МЭС Сибири”, ОАО “МЭС Востока”, ОАО “Сетевая компания Татарстана”, ОАО “МРСК Центра и Поволжья”, ОАО “Тюменьэнерго”, ООО “Нарьянмарнефтегаз”, ОАО “НК “Роснефть”, ЗАО “Ванкорнефть”, ОАО “ДРСК”, ОАО “Газпромнефть” и др.

Производителями данного оборудования являются ОАО “Запорожтрансформатор”, ETD “Transformatory a.s.”, Alstom Grid, ООО НПК “Ленпромавтоматика”, ООО “ИРМ”, Merus Power Dynamics OY.

Многочисленные исследования, большой опыт разработок и эксплуатации привели к усовершенствованиям схем ИРМ и конструкций реакторов.

УШР типа РТМУ-10000/35-УХЛ1 (рис. 4) входит в состав электротехнического комплекса ИРМ, установленного на ПС Ванкор в 2011 г. [6], а на рис. 5 показан УШР типа РТУ-180000/500 в трёхфазном исполнении на ПС Агадырь, 2009 г. [7].

До последнего времени было распространено ошибочное мнение о том, что УШР присущи органические недостатки – несинусоидальность тока и низкое быстродействие.

Анализ результатов проведённых испытаний УШР типа РТУ в сетях показал, что ток искажения реактора при холостом ходе (при отсутствии подмагничивания) и номинальной мощности очень мал. Между режимами холостого хода и номинальной мощности даже без подключения к реактору конденсаторной батареи фильтра, что практикуется на всех эксплуатируемых УШР, ток искажения не превышает 3,5%. При работе реактора в



Рис. 5. УШР типа РТУ-180000/500 в трёхфазном исполнении на ПС Агадырь (2009 г.)

сети имеет значение не ток искажения реактора, а искажение напряжения сети в точке подсоединения реактора. Искажения напряжения определяются в основном не УШР, в существенно большей степени они зависят от характера потребителей сети и от соотношения сопротивлений реактора и сети. Измерения в электрических сетях с установленными УШР показали, что дополнительное искажение напряжения сети при включении реактора оказалось ниже уровня чувствительности регистрирующей аппаратуры [1].

Опыт эксплуатации всех УШР показал, что параметры их быстродействия вполне достаточны для решения основных проблем режимного регулирования. Для поддержания номинальной мощности реактора и её набора от режима холостого хода в течение 3 – 5 с необходима мощность преобразователя всего около 0,15 – 0,2% номинальной мощности. При кратковременном использовании полной мощности преобразователя для обеспечения режимов с форсировкой подмагничивания, которая составляет около 1% мощности реактора, время набора или сброса мощности по осциллограмме переходного процесса составляет, как правило, 0,3 – 0,5 с, а при желании заказчика – 0,15 с. Следует отметить, что за более чем десятилетний период эксплуатации реакторов УШР не возникало проблем, связанных с их быстродействием.

Один из основных методов современной системы стабилизации напряжения электрических сетей – это встречное регулирование напряжения. В соответствии с этим методом напряжение центра питания (генераторов электростанции, трансформаторов подстанций) всегда должно превышать напряжение узла потребления [8]. Напряжение генераторов регулируется возбуждением, а трансформаторов – устройствами регулирования под нагрузкой (РПН) и переключателями на выключенном трансформаторе (без возбуждения – ПБВ).

При этом методе в период наибольших нагрузок напряжение устанавливается выше номинального напряжения сети с целью компенсации потери напряжения сети и поддержания напряжения у потребителей на уровне, близком к номинальному. В итоге в режимах максимальных нагрузок напряжение в узлах нагрузки снижается, а в режимах минимальных нагрузок растёт вплоть до предельно допустимых значений. Таким образом, существующий метод регулирования напряжения допускает и, более того, предусматривает возможность колебания напряжения электрической сети при изменении режима нагрузки, изменяясь в центрах питания в сторону повышения при увеличении нагрузки и в сторону снижения при её уменьшении.

Значительная часть подстанций сетей 6 – 500 кВ имеет разброс текущих значений напряжений в нормальных режимах, достигающий $\pm 15\%$ номинального значения. По различным оценкам, превышение отклонений напряжения против нормативных требований имеет место на более чем 40% всех подстанций 110 – 220 кВ. Это приводит к нарушениям требований ГОСТ 13109-97, когда отклонение напряжения на выводах приёмников электрической энергии превышает как нормально допустимое ($\pm 5\%$), так и предельно допустимое ($\pm 10\%$) значения [8, 9]. Исследования ООО “ЭСКО”, проведённые более чем на 400 подстанциях 6 – 500 кВ электрических сетей России и стран СНГ, показали, что зачастую в разветвлённой сети одного класса напряжения в один и тот же момент времени отклонения напряжений от номинального могут достигать $\pm 15\%$ [8]. Таким образом, следует признать, что проблема стабилизации напряжения в распределительных и высоковольтных сетях остаётся актуальной [2, 3, 8 и др.].

До последнего времени возможности регулирования напряжения в сетях были крайне ограничены – в основном путём переключения РПН трансформаторов и коммутации неуправляемых шунтирующих реакторов. Объём регулируемых конденсаторных батарей в сетях 0,4 – 6 – 10 кВ является недостаточным. Возникающая нестабильность напряжения сети вызывает не только ограничение пропускной способности, увеличение потерь электроэнергии, ускоренный износ коммутационного оборудования, но и повышает вероятность развития аварий из-за локальных аварийных возмущений [2, 3, 8]. Кроме того, при большом числе переключений снижается надёжность работы устройств РПН трансформаторов и коммутационного оборудования подстанций.

До последнего времени считалось, что высокие показатели надёжности электроснабжения (включая стабилизацию напряжения) обеспечиваются в первую очередь наличием достаточного резерва активной мощности. Это справедливо в отношении стабилизации частоты тока. Однако даже

самый большой резерв активной мощности (достигаемый строительством новых электростанций) не обеспечивает стабилизации напряжения всех точек системы. При существующем подходе к регулированию напряжения потоки активной и реактивной мощности обычно совпадают по направлению во всех точках электропередачи. При этом не регулируемые, а коммутируемые устройства компенсации реактивной мощности служат только для частичной разгрузки линий электропередачи, и только в случаях значительных потерь напряжения.

Проблема стабилизации напряжения в узловых точках сети радикально решается внедрением нового метода – метода обеспечения резерва регулируемой реактивной мощности, т.е. оснащением электрических сетей управляемыми источниками реактивной мощности (ИРМ) по принципу равенства напряжения центров питания и узлов нагрузок в установившихся режимах [8]. Даже частичная реализация этой концепции на отдельных подстанциях в некоторых энергосистемах (преимущественно на нефтегазовых разработках Сибири) уже показала её высокую эффективность [1]. При стабилизации напряжения (в том числе и в нештатных ситуациях) радикально снизилось число коммутаций оборудования (в том числе срабатываний устройств РПН трансформаторов).

Регулируемые ИРМ, установленные на электропередачах большой протяжённости, позволяют также повышать предел передаваемой активной мощности по условию статической устойчивости [3, 10]. ИРМ с параллельным соединением регулируемого УШР и нерегулируемой (коммутируемой) конденсаторной батареи уже широко используется для плавного регулирования реактивной мощности как в режиме её потребления, так и в режиме генерации. Использование УШР существенно влияет на технико-экономические показатели работы электропередачи в целом за счёт снижения потерь активной мощности и улучшения качества напряжения [10].

Рассмотрим условия, при которых обеспечивается равенство напряжения центров питания и узлов нагрузок в установившихся режимах [8].

На рис. 6 показана схема простейшей электрической сети с линией электропередачи (ток линии I), узлами центра питания (в левой части схемы) и нагрузки (справа), а также векторные диаграммы напряжения узлов центра питания ($U_{\text{ц}}$) и узла нагрузки ($U_{\text{н}}$) в крайних режимах максимума нагрузки и при холостом ходе. Векторные диаграммы соответствуют случаю, когда в двух узлах установлены два ИРМ, мощность которых в каждом из двух крайних режимов работы линии автоматически изменена для выполнения главного условия новой концепции регулирования – условия равенства напряжения центров питания и узлов нагрузок в установившихся режимах ($U_{\text{ц}} - U_{\text{н}} = \Delta U_{\text{н}} = 0$).

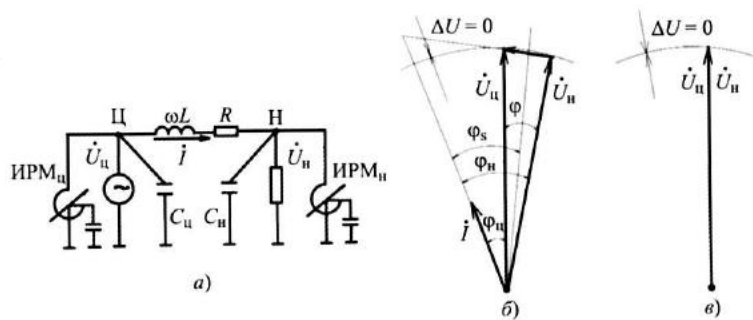


Рис. 6. Расчётная схема с регулируемыми источниками реактивной мощности ИРМ_ц и ИРМ_н (а), диаграммы тока и напряжений (центра питания $\dot{U}_ц$ и узла нагрузки $\dot{U}_н$) в режиме максимума нагрузки (б) и на холостом ходу (в)

Реактивная мощность узла нагрузки или центра питания на рис. 6 определяется тремя составляющими:

- реактивной мощностью присоединённой нагрузки или генерации;
- зарядной мощностью линии электропередачи;
- подключёнными к узлам источниками реактивной мощности.

Реактивная мощность источников центра питания ИРМ_ц и узла нагрузки ИРМ_н, обеспечивающих условие $U_ц - U_н = \Delta U_н = 0$ при заданных максимальных значениях реактивных мощностей нагрузки, генерации и передачи, может быть определена из следующих уравнений:

$$Q_{ин}^{max} \cong Q_н - Q_{сн} + P_{нmax} \left(\frac{R}{\omega L} + \frac{S}{2S_k} \right); \quad (1)$$

$$Q_{инц}^{max} \cong -Q_ц - Q_{сц} + P_{цmax} \left(\frac{R}{\omega L} - \frac{S}{2S_k} \right); \quad (2)$$

где $Q_{ин}^{max}$, $Q_{инц}^{max}$ – реактивные мощности источников центра питания и узла нагрузки при расчётном максимуме нагрузки; $P_{нmax}$, $P_{цmax}$ – активные мощности расчётного максимума в центре питания и узле нагрузки; $Q_н$, $Q_ц$ – реактивные мощности присоединённых нагрузки и генерации; $Q_{сн}$, $Q_{сц}$ – реактивные мощности конденсаторных батарей источников центра питания ИРМ_ц и нагрузки ИРМ_н; S – мощность узла нагрузки; S_k – мощность короткого замыкания узла нагрузки.

Для случая холостого хода передачи, когда

$$P_{нmax} = P_{цmax} = Q_н = Q_ц = 0, \quad (3)$$

выражения (1) и (2) преобразуются в простейшие тождества:

$$\begin{aligned} Q_{ин}^{xx} &= -Q_{сн}; \\ Q_{инц}^{xx} &= -Q_{сц}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $Q_{ин}^{xx}$, $Q_{инц}^{xx}$ – реактивные мощности источников центра питания и узла нагрузки в режиме холостого хода передачи (и в пусковом режиме).

Уравнения (1) – (4) определяют необходимую мощность управляемых устройств индуктивно-ёмкостного типа в центре питания ИРМ_ц и узле нагрузки ИРМ_н во всём диапазоне возможных изменений нагрузки от расчётного максимума до холостого хода. Соответствующим подбором диапазона изменения мощности управляемых индуктивно-ёмкостных устройств принципиально возможно обеспечить полную независимость значений напряжения от уровня нагрузки во всём диапазоне изменений графика нагрузки от расчётного максимума до холостого хода.

Работу ИРМ_ц и ИРМ_н можно пояснить таким образом. При нагрузке ИРМ переводятся в режим выдачи реактивной мощности, причём получается “перекомпенсация” реактивной мощности нагрузки и потерь реактивной мощности линии, ток линии имеет ёмкостную составляющую, чем обеспечивается компенсация падения напряжения в сети. При холостом ходе ИРМ переводятся в режим потребления реактивной мощности, ток линии имеет индуктивную составляющую, чем компенсируется возможное повышение напряжения из-за ёмкостного тока линии (из-за ёмкости линии $C_ц$ и $C_н$).

Для узла центра питания, в случае если источником напряжения является синхронный генератор (СГ), регулируемая реактивная мощность центра питания ИРМ_ц должна быть скорректирована в сторону увеличения выдаваемой реактивной мощности (т.е. увеличена мощность реакторов этого узла) для того, чтобы обеспечить оптимальную работу СГ во всех режимах нагрузки линии (с коэффициентом мощности порядка 0,9 – 0,95). Фактически ИРМ с УШР и БСК рядом с СГ берёт на себя функцию дополнительного синхронного компенсатора. При этом не только обеспечивается функция встречного регулирования напряжения или же стабилизации напряжения в соответствии с предложенным методом, но и увеличивается ресурс работы СГ за счёт исключения режимов потребления реактивной мощности.

Приведённые выражения получены для простейшей передачи и центра питания с идеальным источником напряжения бесконечной мощности (рис. 6), однако они могут быть использованы и

для оценочных расчётов более сложных сетей. От центра питания могут отходить несколько линий. В этом случае, естественно, возможен точный расчёт по программам, учитывающим все особенности системы. Многочисленные точные и оценочные расчёты, проделанные для конкретных систем электроснабжения, показали, что выражения, полученные для простейшей передачи (рис. 6), достаточно точно могут быть распространены и на более сложную сеть произвольной конфигурации с заданными множествами центров питания и узлов нагрузки.

Исходя из новых требований электрических сетей (по быстродействию не более 0,15 с и по содержанию в токе УШР высших гармоник) и с учётом проведённых исследований, накопленного опыта проектирования, производства, из анализа результатов многих заводских и сетевых испытаний, специалистами ООО «ЭСКО» проведена инновационная разработка для FACTS-технологии и интеллектуальных электрических сетей нового ферротиристорного компенсатора (ФТК) реактивной мощности [7]. В состав оборудования ФТК входит трёхобмоточный трансформатор с регулируемым насыщением фаз, быстродействующий регулятор насыщения фаз трансформатора, широкополосный фильтр высших гармоник и батарея конденсаторов (БСК).

Важное преимущество новых ФТК в том, что БСК подключается не к высоковольтной сети, а к относительно низковольтной обмотке специального трансформатора с регулируемым насыщением фаз. Это позволяет использовать существенно более простую, относительно низковольтную БСК, а также ограничивает броски тока при включении БСК (дополнительное важное увеличение надёжности работы ФТК) и служит дополнительным фильтром высших гармоник. Вторичная обмотка специального трансформатора может быть использована также как дополнительный источник напряжения для питания собственных нужд подстанции.

Основное назначение ИРМ типа ФТК – это автоматическая стабилизация напряжения в точке подключения с заданной точностью, автоматическое ограничение (вплоть до полного исключения) перетоков реактивной мощности в прилегающей сети. Применение ФТК в электрических сетях:

повышает пропускную способность сети (до 1,25 раз);

до 30% снижает удельные потери при передаче электроэнергии;

практически исключает работу коммутационного оборудования при регулировании напряжения узлов нагрузки в нормальных режимах (в десятки раз уменьшает число срабатываний);

снижает вероятность развития аварий, обусловленных нарушением статической устойчивости по напряжению;

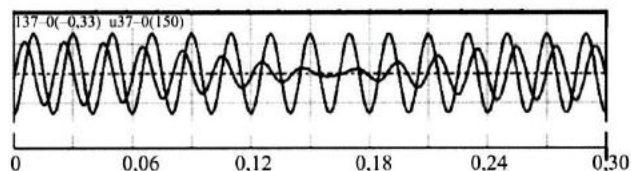


Рис. 7. Осциллограмма процесса перехода ФТК из ёмкостного режима (режима выдачи в сеть реактивной мощности) к индуктивному режиму (режиму потребления реактивной мощности):

до момента времени около 0,15 с – ёмкостный режим; после момента 0,15 с – индуктивный режим

исключает режимы недо возбуждения генераторов [7].

В качестве примера на рис. 7 проиллюстрирован процесс перехода ФТК из режима выдачи в сеть реактивной мощности к режиму потребления. На графике синусоида с постоянной амплитудой – напряжение на ФТК, с изменяющейся амплитудой – ток ФТК. Видно, что от момента времени 0,03 с до момента 0,15 с происходит снижение тока, а следовательно, и генерируемой мощности до нуля с последующим плавным переходом в режим потребления до момента около 0,25 с, после которого устанавливается стационарный режим. Таким образом, сброс генерируемой мощности протекает за время около 0,12 с и набор потребляемой мощности – так же за 0,12 с. Во всём диапазоне регулирования тока ФТК высшие гармоники не превышают 1 – 2% номинального тока.

Рассмотрим актуальный вопрос об ограничении токов короткого замыкания (ТКЗ) как в сетях 10 – 35 кВ, так и в сетях 110 – 220 кВ. Это требуется для повышения надёжности работы сложнозамкнутых сетей, для облегчения работы выключателей, имеющих ограниченный ток отключения, и другого оборудования линий и подстанций. Предложено токоограничивающее устройство в виде вставки переменного тока, состоящей из не регулируемого линейного токоограничивающего реактора последовательного включения (РТ) и подключённых к его вводам двух ИРМ, содержащих УШР и БСК [11, 12].

При возникновении короткого замыкания в одной части электрической сети ток КЗ ограничивается токоограничивающим реактором (РТ). В электрической сети может происходить переток активной и реактивной мощности из одной части в другую. Это может быть или нормальным режимом работы, когда идёт переток энергии из одной части сети в другую, или послеаварийным (или ремонтным) режимом работы после выхода из строя или плановой остановки (например, на ремонт) генерирующих мощностей одной из частей сети. При перетоках мощности на неуправляемом линейном токоограничивающем реакторе РТ в отсутствие ИРМ возникает падение напряжения. Кроме того, из-за потребления нагрузкой реактив-

ной мощности и перетока реактивной мощности в частях сети напряжение также может недопустимо снижаться по сравнению с номинальным (в дневное время, при максимуме потребления электроэнергии), а потери энергии в сети и трансформаторах – увеличиваться. Возможно и недопустимое повышение напряжения, когда в сети возможен избыток реактивной мощности (в ночное время, при минимальной нагрузке). В этих случаях необходимый уровень напряжения поддерживается за счёт компенсации реактивной мощности двумя источниками реактивной мощности ИРМ.

Кроме ограничения тока, появляется возможность плавно регулировать эквивалентную реактивную мощность сети, регулировать и стабилизировать напряжение сети в двух прилегающих к вставке частях.

При отключении источника электрической энергии в одной из частей электрической сети оказывается возможной передача энергии из соседней части сети при сохранении необходимого уровня напряжения за счёт компенсации падения напряжения на линейном токоограничивающем реакторе.

Рассматриваемый ограничитель тока КЗ – вставка переменного тока – составлен из электротехнического оборудования, выпускаемого промышленностью и имеющего положительный опыт эксплуатации. В настоящее время нет никаких технических препятствий для внедрения ограничителей тока КЗ с БСК и УШР и уже разрабатываются первые проекты их внедрения.

В частности, проведены дополнительные расчётные исследования регулируемых токоограничивающих устройств – вставок переменного тока – для нескольких конкретных точек их установки в электрических сетях и разработаны технические предложения по их комплектации, установке и наладке. Проведённые оценки для кольцевой системы 220 кВ показывают, что затраты на установку комплексов линейных нерегулируемых токоограничивающих реакторов, батарей конденсаторов и УШР значительно меньше затрат на строительство резервных электростанций – по существу единственный в ближайшем будущем практически доступный альтернативный вариант. В ближайшее время на одной из подстанций 10 кВ намечена установка вставки переменного тока между обмотками НН двух параллельно работающих трансформаторов. В такой схеме, кроме ограничения тока КЗ и стабилизации напряжения, достигается необходимое увеличение надёжности электроснабжения двух важных потребителей. На другой подстанции 220/110 кВ намечена установка вставки, которая позволит снизить токи короткого замыкания в сети 110 кВ и стабилизировать напряжения на шинах подстанции при возникающих возмущениях в подводящей сети 220 кВ от $0,7U_{ном}$ до $1,15U_{ном}$, что увеличит устойчивость работы системы в целом.

Выводы

1. Проблема стабилизации напряжения узловых точек энергосистемы радикально решается внедрением метода обеспечения резерва регулируемой реактивной мощности, т.е. оснащением электрических сетей управляемыми источниками реактивной мощности, выбираемыми по условию равенства напряжения центров питания и узлов нагрузок в установившихся режимах.

2. Даже частичная реализация этого метода на отдельных подстанциях в некоторых энергосистемах (преимущественно в Сибири на нефтегазовых разработках) доказала его эффективность. Установка регулируемых ИРМ обеспечила стабилизацию напряжения (в том числе и в аварийных ситуациях) и радикальное снижение числа коммутаций оборудования (в том числе срабатываний устройств РПН трансформаторов).

3. Доказано и подтверждено на практике, что устройства ИРМ с УШР и БСК и ФТК позволяют решить проблему стабильности напряжения современных сетей 6 – 500 кВ и ликвидировать предпосылки развития аварий из-за понижения напряжения сети.

4. Оснащение сети подобными устройствами до технического целесообразного уровня позволяет автоматически стабилизировать напряжение в пределах 1 – 2% заданной уставки не только в нормальных, но и в ремонтных, пусковых и послеаварийных режимах.

5. Устройство в виде вставок переменного тока, состоящих из нерегулируемого РТ последовательного включения и подключённых к его вводам двух ИРМ из УШР и БСК, кроме ограничения тока КЗ, позволяет плавно регулировать реактивную мощность сети, регулировать и стабилизировать напряжение сети в двух прилегающих к вставке частях.

6. Источники реактивной мощности на основе управляемых подмагничиванием реакторов или трёхобмоточных трансформаторов с насыщающимися стержнями и коммутируемых батарей конденсаторов решают назревшую проблему создания надёжных, быстродействующих и плавно регулируемых устройств стабилизации напряжения. Достаточное быстродействие и широкий диапазон регулирования реактивной мощности оптимизирует стационарные режимы работы электрических сетей и синхронных генераторов по критериям потерь мощности и устойчивости. Регулировочные возможности указанных ИРМ практически позволяют отказаться от устройств РПН трансформаторов и облегчить работу коммутационной аппаратуры.

Список литературы

1. *Управляемые* подмагничиванием электрические реакторы / Под ред. Брянцева А. М. М.: Знак, 2010.
2. *Стабилизация* напряжения электрической сети высокого напряжения внутрисетевыми управляемыми источниками реактивной мощности индуктивно-ёмкостного типа: Совместное заседание президиума Научно-технической коллегии НП «НТС ЕЭС» и Научного совета РАН по проблемам надёжности и безопасности больших систем энергетики, Москва, 25 ноября 2010 г. – Электричество, 2011, № 3.
3. *Применение* управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов на линиях электропередачи высокого и сверхвысокого напряжений / Брянцев А. М., Дорофеев В., Зильберман С. М., Смирнов А., Смоловик С. В. – СИГРЭ, В4 – 307, Париж, 2006.
4. *Регулируемые* источники реактивной мощности с управляемыми подмагничиванием шунтирующими реакторами и батареями конденсаторов / Брянцев А. М., Брянцев М. А., Дягилева С. В., Карымов Р. Р., А. И. Лурье, Маклецова Е. Е., Негрышев А. А. – Электротехника, 2010, № 4.
5. *Hingorani N. G., Gyugyi L.* Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE Press, 2000.
6. *Введён* в эксплуатацию источник реактивной мощности на подстанции 35 кВ Ванкорского нефтяного месторождения / Базылев Б. И., Брянцев М. А., Дягилева С. В., Лурье А. И., Негрышев А. А. – Электротехника, 2012, № 3.
7. *Высоковольтные* статические компенсаторы реактивной мощности 110 – 1150 кВ – новая инновационная разработка для FACTS-технологии и “интеллектуальных” электрических сетей / Брянцев М. А., Базылев Б. И., Лурье А. И., Райченко М. О.: Доклад на XIII Международной научно-практической конференции “Силовые и распределительные трансформаторы, реакторы. Системы диагностики”, Москва, 2012, 19 – 20 июня.
8. *Регулирование* и стабилизация напряжения высоковольтной электрической сети управляемыми источниками реактивной мощности индуктивно-ёмкостного типа / Брянцев А. М., Базылев Б. И., Лурье А. И., Смоловик С. В. – Электричество, 2012, № 10.
9. *ГОСТ 13109-97.* Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
10. *Карпов А. С.* Компьютерное моделирование управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов для расчёта электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах. – Электрические станции, 2012, № 7.
11. *Пат. 2374738 (РФ).* Токоограничивающее устройство электрической сети / Брянцев А. М., Лурье А. И. Оpubл. в Б. И., 2009, № 33.
12. *Брянцев А. М., Лурье А. И., Смоловик С. В.* Вставки переменного тока для ограничения тока КЗ и компенсации реактивной мощности с использованием управляемых подмагничиванием реакторов. – Электричество, 2012, № 8.

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Редакция готова предоставлять отдельные статьи или полные выпуски журналов «Электрические станции» и «Энергохозяйство за рубежом» прошедших и текущих номеров в электронном виде:

- сканкопии статей из журнала «Электрические станции» за 1930 – 2000 гг. и из журнала «Энергохозяйство за рубежом» за 1956 – 1993 гг. (*стоимость 1 стр. – 47 руб.*)
- pdf-файлы статей, начиная с 2001 г. (*стоимость одной статьи – 295 руб.*)
- pdf-файлы статей текущего года (*стоимость одной статьи – 826 руб.*)
- CD-диски годовых сборников журнала «Электрические станции» за 2001 – 2011 гг., где на экране компьютера вы увидите электронную версию журнала, в точности соответствующую печатному оригиналу (*стоимость одного CD с доставкой по России – 472 руб.*).

Подробности см. на www.elst.energy-journals.ru/podpiska