

Управляемый подмагничиванием трансформатор¹

СМИРНОВ С.С., ОСАК А.Б.

В качестве управляемого источника реактивной мощности предлагается использовать трехфазную группу однофазных управляемых подмагничиванием трансформаторов броневых типа. Обмотки управления размещаются на боковых стержнях, включаются встречно и подключаются к управляемому источнику постоянного напряжения. Обмотки управления создают круговой магнитный поток, что приводит к изменению потребляемой реактивной мощности обмотки среднего стержня. Необходимая мощность источника постоянного напряжения менее 1% мощности трансформатора. Так как обмотки управления закорочены через источник постоянного тока, то в них возникает ток частотой 100 Гц, приводящей к выравнению напряжений 50 Гц на обмотках управления и их взаимной компенсации. Взаимодействие магнитных полей трансформатора имеет сложный нелинейный характер, и поэтому требуется экспериментальная оценка его режимных свойств. В качестве однофазного управляемого трансформатора может использоваться серийный трехфазный трансформатор. Обмотки высокого напряжения боковых стержней включаются встречно, и к ним подсоединяется источник постоянного напряжения. Испытания выполнены на трехфазном трансформаторе мощностью 820 ВА напряжением 380 В, который использовался как однофазный трансформатор мощностью 273 ВА с напряжением 220 В. Испытания показали, что потребляемая реактивная мощность трансформатора пропорциональна приложенному напряжению и току в обмотках управления. При токе управления 1,91 А и напряжении 220 В реактивная мощность равна 265 вар. Ток 3-й гармоники составил 7,7%, ток 5-й и 7-й гармоник менее 1%. Подключение активной нагрузки к вторичной обмотке не повлияло на регулирование реактивной мощности. Подключение к вторичной обмотке конденсаторной батареи позволило регулировать реактивную мощность в пределах от +161 ВА до –112 ВА, т.е. работать функционально как синхронный компенсатор. Технико-экономическое сравнение управляемого трансформатора мощностью 40 МВА, реализованного с использованием трехфазных трансформаторов мощностью по 40 МВА с синхронным компенсатором 50 МВА, показало, что он имеет меньшие удельные капиталовложения при лучших регулировочных и эксплуатационных характеристиках.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электроэнергетическая система, качество электрической энергии, реактивная мощность, регулирование напряжения

При передаче активной мощности от электростанций к потребителям по линиям электропередачи (ЛЭП) требуются источники реактивной мощности, которые обеспечивают допустимые значения напряжения в узлах присоединения потребителей и электростанций, статическую и динамическую устойчивость режимов системы. Для ведения режима энергосистемы по напряжению и реактивной мощности используются плавно регулируемые и дискретно регулируемые источники реактивной мощности. В качестве плавно регулируемых источников реактивной мощности используются генераторы электростанций, синхронные компенсаторы (СК), статические тиристорные компенсаторы (СТК), управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы (УШРП), управляемые тиристорами реакторы трансформаторного типа (УШРТ), транзисторные статические компенсаторы (СТАТКОМ). В качестве дискретно управляемых источ-

ников используются шунтирующие реакторы (ШР) и батареи конденсаторов (КБ).

В протяженных электрических сетях высокого напряжения УШРП широко используются с целью стабилизации напряжения, сокращения потерь и увеличения надежности функционирования [1, 2]. Уже в 2011 г. УШРП работали в 65 узлах ЕЭС и показали высокие режимные и эксплуатационные свойства [2]. Использование комбинации УШРП+КБ, позволяющей не только поглощать, но и генерировать реактивную мощность, улучшает свойства режимов высоковольтных протяженных ЛЭП [1].

Принцип работы УШРП показан на рис. 1. Конструкция УШРП отличается от конструкции шунтирующего реактора тем, что стержень фазы разделен на два сердечника. Сетевая обмотка охватывает оба стержня. Обмотка управления расположена на каждом из стержней и подключена к источнику постоянного напряжения. Постоянный ток создает круговое магнитное поле и приводит к насыщению сердечника. За счет насыщения стали

¹ В порядке обсуждения. Ред.

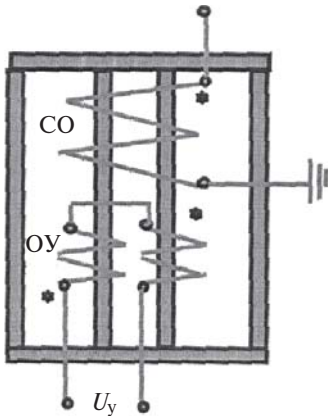


Рис. 1. Схема устройства одной фазы УШРП

сердечника изменяется индуктивность сетевой обмотки в широком диапазоне. Работа боковых стержней не отличается от работы в ШР.

Однофазный УШРП имеет сложную конструкцию магнитопровода – четыре стержня и три обмотки. Управляемый однофазный источник реактивной мощности можно реализовать с использованием управляемого подмагничиванием трансформатора (УПТр), принцип работы которого аналогичен работе УШРП.

Конструкция управляемого подмагничиванием трансформатора. Если в однофазном трансформаторе броневого типа на боковых стержнях разместить обмотки управления, подключенные к источнику постоянного тока, то получим управляемый подмагничиванием трансформатор (УПТр) (рис. 2). На основном стержне размещается первичная обмотка высокого напряжения (ВН) и вторичная обмотка низкого напряжения (НН), а на боковых стержнях размещаются обмотки управления (У1 и У2). Обмотки ВН, У1 и У2 имеют одинаковое общее сечение. Сечение обмотки НН определяется значением подключенной местной нагрузки и может составлять 20–100% сечения основной обмотки.

Боковые стержни имеют сечение стали, в 2 раза меньше, чем центральный стержень. Суммарное сечение обмоток увеличивается в 1,5–2 раза.

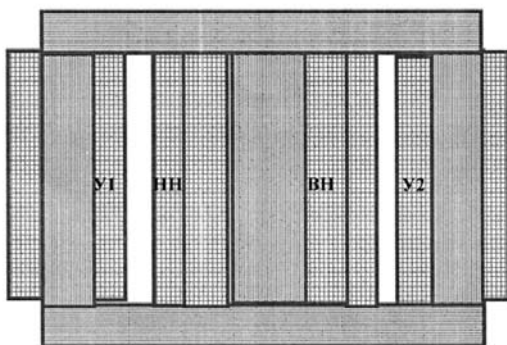


Рис. 2. Схема управляемого подмагничиванием трансформатора

Схема соединения обмоток приведена на рис. 3. Обмотка ВН подключается к сети. Обмотки подмагничивания У1 и У2 включены встречно, и к ним подключены конденсатор КБ и автоматический регулятор напряжения (РН), являющийся регулируемым источником постоянного напряжения. Так как обмотка управления закорочена конденсатором, то переменное напряжения на обмотке будет незначительным. Если регулятор напряжения получает питание от обмотки НН, то УПТр будет работать при отсутствии внешних источников питания (автономно).

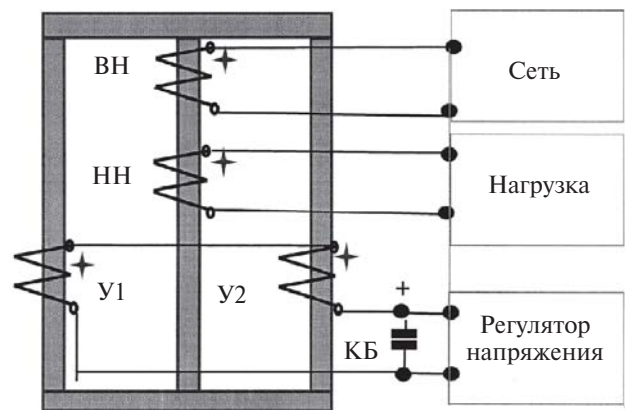


Рис. 3. Схема подключения обмоток УПТр

К обмотке низкого напряжения НН может быть подключена нагрузка. Если к обмотке НН присоединить коммутируемую батарею конденсаторов, то такой трансформатор, если его рассматривать со стороны энергосистемы, будет эквивалентен синхронному компенсатору. Максимальная генерируемая реактивная мощность будет соответствовать мощности конденсаторной батареи.

Управляемый трансформатор может быть реализован за счет использования серийного трехфазного трансформатора. Обмотки среднего стержня используются как сетевая и нагрузочная. Сетевые обмотки боковых стержней используются как управляющие, и к ним подсоединяется регулятор тока управления. Если используется трехфазный трансформатор мощностью 25 МВА с потерями короткого замыкания 0,8%, то номинальная мощность РН будет 0,8%. Мощность РН значительно меньше мощности УПТр. В качестве УПТр могут использоваться трансформаторы, находящиеся в резерве (на складах) у электросетевых предприятий, так как не требуется их переделка и изменяется только схема подключения к внешним устройствам.

Режимы работы УПТр. При отсутствии подмагничивания УПТр работает как обычный трансформатор. При подключении регулятора напряжения к обмоткам управления в них возникает постоянный

ток, который приводит к насыщению стали боковых стержней и изменению тока сетевой обмотки ВН. На управляющих обмотках У1 и У2 кроме напряжения 50 Гц наводится пилообразное напряжение частотой 100 Гц. Так как обмотки управления включены встречно и закорочены конденсатором и РН, в них возникает ток частотой 50 и 100 Гц.

Расчет и анализ регулировочных свойств УПТр сложен из-за взаимодействия магнитопровода, находящегося в режиме глубокого насыщения, с токами обмоток основной и управления. Для исследования регулировочных свойств УПТр использовался УПТр малой мощности, реализованный на трехфазном трансформаторе.

Объект испытаний. Испытывался трехфазный трансформатор с номинальным напряжением 380 В мощностью 820 ВА; фазное напряжение первичной обмотки 220 В; мощность фазы номинальная 273 ВА; ток 1,85 А; номинальное напряжение вторичной обмотки 26 В. Трансформатор использовался в качестве однофазного УПТр мощностью 270 МВА. Схема подключения обмоток приведена на рис. 3. К сети подключалась обмотка ВН среднего стержня. Обмотки ВН крайних стержней были включены встречно и используются в качестве обмоток управления У1 и У2. К обмотке НН среднего стержня подключалась нагрузка (активная, батарея конденсаторов, фильтр высшей гармоники).

В качестве источника постоянного напряжения использовался блок питания с номинальным напряжением 24 В и номинальным током 2 А. Значение тока управления изменялось с помощью реостата. К входу обмотки управления был присоединен электролитический конденсатор (4800 мкФ), который обеспечивал шунтирование переменного тока обмотки.

В процессе испытаний измерялись и регистрировались параметры режима сетевой обмотки и обмотки управления: действующие значения напряжения и тока, активная и реактивная мощности, осциллограммы токов и напряжений, гармонический состав токов, напряжений.

Режим холостого хода УПТр. Параметры режима холостого хода среднего стержня приведены в табл. 1. При номинальном напряжении ток холостого хода равен 0,92% номинального тока. При напряжении 263 В ток возрастает до 1,24%. Ток холостого хода значительно меньше номинального тока.

Регулировочные характеристики УПТр в режиме управляемого реактора. Осциллограммы токов и напряжений сети и обмотки управления при напряжении на первичной обмотке 220 В и токе 2 А приведены на рис. 4, из которого видно, что напряжение на обмотке управления близко к посто-

янному. В токе обмотки управления кроме постоянного тока имеются токи частотой 50 и 100 Гц. Ток в первичной обмотке близок к синусоиде.

Таблица 1

Значение параметра			
U, В/%	I, А/%	P, Вт/%	Q, вар/%
51,30/23,32	0,005/0,27	0,14/0,05	0,18/0,07
101,18/45,99	0,008/0,43	0,52/0,19	0,55/0,20
150,45/68,38	0,011/0,59	1,11/0,41	1,16/0,43
202,02/91,83	0,015/0,81	1,88/0,69	2,23/0,82
221,02/100,46	0,017/0,92	2,21/0,81	2,83/1,04
241,80/109,91	0,019/1,03	2,64/0,97	3,60/1,32
263,20/119,63	0,023/1,24	3,11/1,14	4,88/1,79

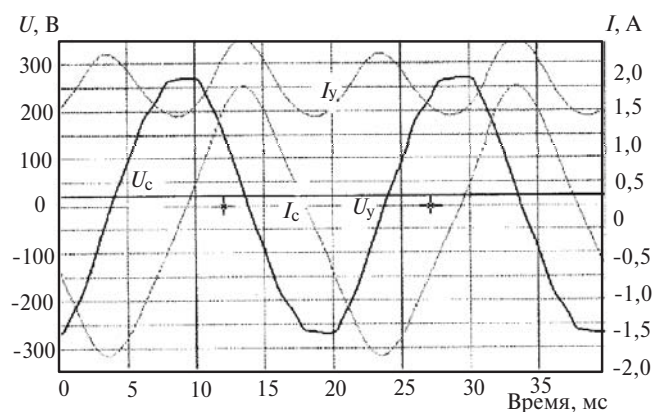


Рис. 4. Осциллограммы напряжений и токов первичной обмотки и обмотки управления при токах управления 2 А

Зависимость тока сети от тока управления при разном напряжении на первичной обмотке отражена в табл. 2. Ток в первичной обмотке зависит как от тока управления, так и от напряжения сети. Под воздействием тока управления ток в первичной обмотке изменяется в широких пределах. Следует отметить, что ток в первичной обмотке пропорционален напряжению и току управления. Эту зависимость можно интерпретировать как изменение значения индуктивной проводимости пропорционально току управления

Зависимость потребляемой УПТр из сети реактивной мощности от тока управления при разных напряжениях сети отражена в табл. 3. Реактивная мощность зависит как от тока управления, так и от напряжения сети. За счет изменения тока управления потребляемая мощность изменяется в широком диапазоне, и эта зависимость близка к квадратичной. При токе управления 1,93 А потребляемая реактивная мощность равна номинальной мощности трансформатора.

Таблица 2

Ток управления I_y , А	Ток сети, А, при различных значениях U_c , В					
	100	150	200	220	240	260
0	0,008	0,011	0,015	0,017	0,019	0,023
0,193	0,136	0,172	0,19	0,2	0,216	0,21
0,499	0,23	0,332	0,412	0,436	0,446	0,474
1,036	0,346	0,502	0,65	0,716	0,776	0,824
1,48	0,453	0,664	0,867	0,946	1,025	1,102
1,9	0,577	0,84	1,108	1,2	1,29	1,37

Таблица 3

Ток управления I_y , А	Значения реактивной мощности Q , вар, при различных значениях напряжения сети U_c , В					
	100	150	200	220	240	260
0	0,55	1,162	2,234	2,827	3,596	4,828
0,185	13,9	25,9	38,2	43,7	51,3	54,2
0,506	23,2	50,1	83,7	96,5	107,5	123,4
1,024	35,2	76,3	130,7	158,5	187,5	216
1,47	45,9	100,9	174	209,7	245	287,7
1,91	58,7	127	224	265	306,6	354

В токе первичной обмотки наиболее существенной является 3-я гармоника, коэффициент которой составляет при номинальном токе и номинальном напряжении 7,66%. Токи 5-й и 7-й гармоник при номинальном токе меньше 1%. Зависимость значения токов 3-й гармоники в токе первичной обмотки при изменении тока управления и напряжения сети показана на рис. 5. Этот ток будет компенсирован, если обмотки НН трехфазной группы однофазных УПТр будут соединены в треугольник.

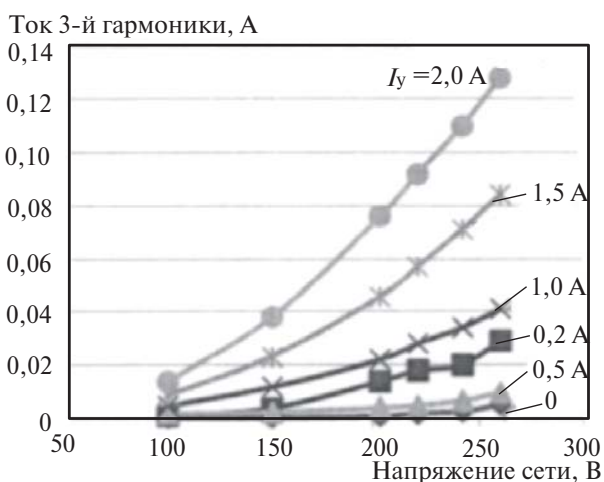


Рис. 5. Токи 3-й гармоники в токе первичной обмотки УПТр

Зависимости тока 100 Гц в обмотке управления от тока управления и напряжения сети приведены на рис. 6. Ток 100 Гц возрастает при увеличении тока управления и напряжения сети. Ток 100 Гц уменьшает токи высших гармоник в сетевой обмотке и не приводит к заметному увеличению потерь в обмотке управления, так как при токе управления 2 А ток 100 Гц равен 0,33 А (15%).

Регулировочные характеристики УПТр при подключении батареи конденсаторов. К вторичной обмотке УПТр была подключена батарея конденсато-

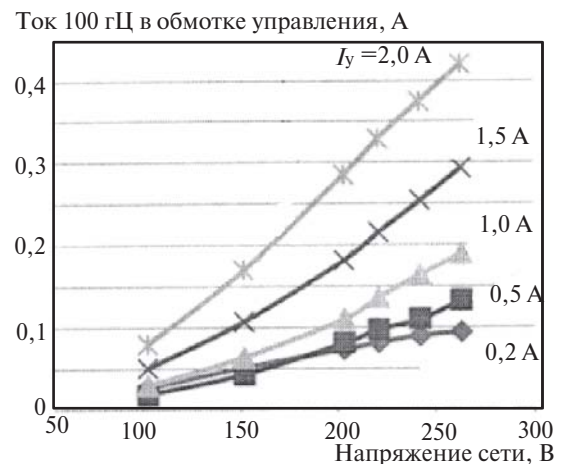


Рис. 6. Зависимость тока 100 Гц в обмотках управления УПТр от напряжения и тока управления

ров номинальной мощностью 162 вар. При отсутствии тока управления реактивная мощность по первичной обмотке имеет емкостный характер и равна 161 вар, а при токе управления 2 А имеет индуктивный характер и равна 112 вар.

Зависимость реактивной мощности сети от тока управления при разных напряжениях сети отражена на рис. 7. Реактивная мощность зависит как от тока управления, так и от напряжения сети. За счет изменения тока управления мощность изменяется в широком диапазоне и эта зависимость близка к квадратичной.

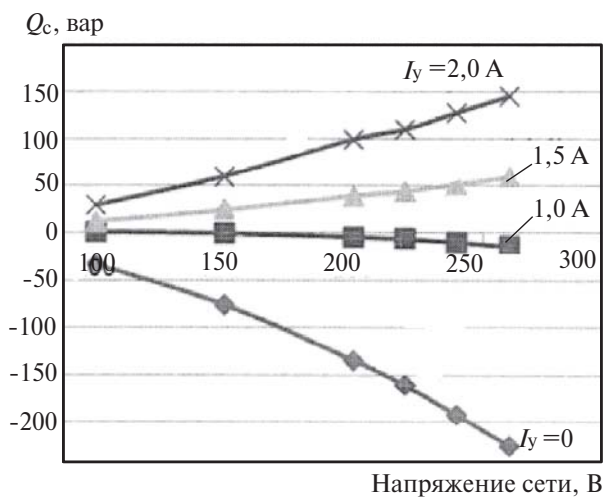


Рис. 7. Зависимость реактивной мощности в первичной обмотке УПТр от напряжения сети

Регулировочные характеристики УПТр при активной нагрузке. К вторичной обмотке был подключен резистор мощностью 106 Вт при номинальном напряжении. Зависимость потребляемой УПТр из сети реактивной мощности от тока управления при разных напряжениях сети приведена на рис. 8. Реактивная мощность зависит от тока управления и от напряжения сети. При подключении к обмот-

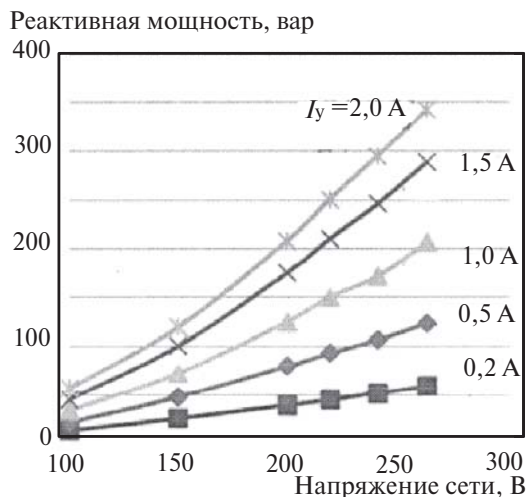


Рис. 8. Зависимость реактивной мощности в первичной обмотке УПТр от напряжения сети при наличии активной нагрузки

ке НН активной нагрузки сохраняется возможность управления потребляемой реактивной мощностью за счет тока обмотки управления.

Режим работы обмотки управления УПТр. Были проведены измерения режима обмоток управления УПТр с целью определения взаимодействия обмоток управления У1 и У2. Так как обмотки включены встречно и закорочены конденсатором, в них происходит взаимная компенсация переменных напряжений. Были проведены измерения режима обмотки управления при работе в режиме реактора при мощности, близкой к номинальной. Результаты измерений применены в табл. 4 (U_y — суммарное напряжение на обмотках управления; U_1 — напряжение одной обмотки управления; I_y — ток управления).

Отмечается низкий уровень напряжения гармонических составляющих на источнике питания вследствие значительной взаимной компенсации наведенных напряжений на обмотках управления. За счет тока управления одновременно изменяется напряжение обоих плеч обмотки управления. Значение напряжения основной гармоники 50 Гц на одной обмотке больше постоянной составляющей в 5,28 раза, а суммарное напряжение двух обмоток равно 1% постоянного напряжения.

Таблица 4

Частота, Гц	Значение параметра		
	U_y , В/%	U_1 , В/%	I_y , А/%
0	23,8/100	11,86/100	2,12/100
50	0,24/1,008	62,64/528,162	0,068/3,208
100	0,042/0,176	3,57/30,101	0,393/18,538
150	0,021/0,088	12,58/106,071	0,0096/0,453
200	0,004/0,017	0,59/4,975	0,028/1,321
250	0,0015/0,006	1,55/13,069	0,0058/0,274
350	0,006/0,025	1,36/11,467	0,0013/0,061

Экономические характеристики устройств компенсации реактивной мощности. Регулирование напряжения и реактивной мощности связано с обеспечением качества электрической энергии и минимизацией потерь, поэтому важны экономические свойства источников реактивной мощности. Дискретно регулируемые источники значительно дешевле плавно регулируемых.

Для оценки затрат при проектировании используются укрупненные показатели сооружения подстанций и ЛЭП, приведенные в [3]. В качестве исходных используются сметные стоимости на 2000 г. Текущие показатели определяются умножением на коэффициент соответствующего года и на террито-

Таблица 5

Тип устройства	Мощность, Мвар	Стоимость, тыс. руб.				
		устройства	выключателя		трансформатора	Всего
			ВН	НН		
Напряжение 110 кВ						
ШР	100	9500	7300	—	—	16800
КБ	54	14750	7300	—	—	22050
УШРП	32	10500	7300	0	0	17800
УПТр	40	0	7300	500	021900	29200
СК	50	29000	7300	500	7300	44100
СТК	100	135000	7300	—	10200	153000
Напряжение 220 кВ						
ШР	100	9500	15000	—	—	24500
КБ	54	14750	15000	—	—	29750
УШРП	63	19500	15000	0	0	34500
УПТр	40	0	15000	0	21900	36900
СК	50	48000	15000	500	7300	70800
СТК	100	135000	15000	500	15870	166370

риальный коэффициент. При выборе источников реактивной мощности необходимо учитывать стоимость выключателей с ячейкой распределительного устройства, которая может быть значительно больше, чем стоимость самого источника реактивной мощности. В качестве основного рассматривается элегазовый выключатель. Стоимость элегазового выключателя с ячейкой для сети 220 кВ в ценах 2000 г. равна 15 млн руб., а для напряжения 35 кВ — 0,6 млн руб.

Результирующие значения стоимости устройств компенсации реактивной мощности с учетом подключения к сети приведены в табл. 5. В рассмотренном варианте стоимость УПТр определялась исходя из использования трех серийных трехфазных трансформаторов. Стоимость такого УПТр меньше стоимости СК, но больше стоимости УШРП. В то же время, предлагаемый УПТр в отличие от любых других источников реактивной мощности выполняет еще и функции понижающего трансформатора.

Выводы. 1. Подмагничивание боковых стержней однофазного трансформатора позволяет управлять потребляемой им реактивной мощностью в широких пределах вплоть до номинальной мощности трансформатора.

2. Вторичная обмотка УПТр позволяет подключать нагрузку, батареи конденсаторов, фильтры высших гармоник.

3. Однофазный управляемый трансформатор может быть реализован за счет серийного трехфазного трансформатора при подключении сетевых обмоток крайних стержней к источнику постоянного тока, а обмотки среднего стержня — к сети. При подключении к нагрузочной обмотке конденсаторной батареи реактивная мощность будет регулироваться в пределах номинальной мощности первичной обмотки.

4. Трехфазная группа однофазных УПТр с подсоединенными конденсаторными батареями по своим свойствам соответствует синхронному компенсатору, но имеет меньшую стоимость, меньшие потери, лучшие экономические и регулировочные свойства.

5. Номинальная мощность регулятора тока обмоток управления менее 1% номинальной мощности УПТр.

6. УПТр могут найти широкое применение: для их реализации могут использоваться трансформаторы, находящиеся в резерве (на складах) у электросетевых предприятий, так как не требуется специальная конструкция. Для реализации УПТр необходима только разработка и установка возбудителей и регуляторов напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Управляемые** подмагничиванием шунтирующие реакторы/Под ред. Г.А. Евдокунина. — СПб: Родная Ладога, 2013, 280 с.

2. Долгополов А.Г., Кондратенко А.Г., Уколов С.В., Посталатий Д.В.: <http://cyberlenink.ru/article/n/upravlaemye-shuntiruyushchie-reactory-dlya-elektricheskikh-setey>

3. **Справочник** по проектированию электрических сетей/Под ред. Д.А. Файбисовича. — М.: ЭНАС, 2009, 392 с.

[3.06.14]

А в т о р ы: **Смирнов Сергей Сергеевич** окончил электроэнергетический факультет Московского *Elektrichestvo (Electricity)*, 2015, No. 9, pp. 20–26.

энергетического института в 1962 г. В 2001 г. в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН) защитил докторскую диссертацию «Методы исследования и нормализации режимов высших гармоник в сетях высокого напряжения». Ведущий научный сотрудник ИСЭМ СО РАН.

Осак Алексей Борисович окончил энергетический факультет Иркутского государственного технического университета в 1998 г. Научный сотрудник ИСЭМ СО РАН.

Magnetically controlled transformer

SMIRNOV Sergey Sergeevich (*L.A. Melent'yev Institute of Power Systems of the Siberian Branch Russian Academy of Sciences (MIPS SB RAS), Irkutsk, Russia*) — *Leading Scientific Researcher, Dr. Sci. (Eng.)*

OSAK Aleksey Borisovich (*MIPS SB RAS, Irkutsk, Russia*) — *Research Assistant*

The research suggests that a three-phase transformer tank of single-phase shell-type magnetically controlled transformers be used as an adjustable reactive power source. The control windings are placed on side legs and connected in a series-opposing arrangement. The are connected to the controlled DC voltage source. The control windings create a magnetic circular flux, which leads to changes in the consumed reactive power of the center-leg winding. The necessary power of the DC voltage source is less than 1 % of the transformer power. Since the control windings are short circuited through the DC voltage source, the current that appears has a frequency of 100 Hz, which leads to equal voltages of 50 Hz on the control windings and their mutual compensation. The interaction between the magnetic fields of the transformer is a complex nonlinear nature and therefore it is necessary to experimentally assess its operation characteristics. A three-phase commercial transformer can be used as a one-phase controlled transformer. The high-voltage windings of side legs are connected in a series-opposing manner and DC voltage source is connected to them. Tests were conducted on an 820 VA/220 V single-phase transformer. The tests have shown that the consumed reactive power of the transformer is proportional to the voltage and current applied to the control windings. With the control current of 1,91 A and voltage of 200 V the reactive power made up 265 var. The current of the 3rd harmonic was 7,7 %, and that of the 5 th, and 7 th harmonics — less that 1 %. Connection of a resistive load to the secondary winding did not affect the reactive power adjustment. The connection to the secondary winding of the capacitor tank made it possible to adjust reactive power in the range from +161 VA to -112 VA, i.e. to function like a synchronous compensator.

Key words: *electric power system, power quality, reactive power, voltage control*

REFERENCES

1. **Upravlyayemye** podmagnichivaniem shuntiruyuschchie reactory/Pod redaktsiyey G.A. Evdokunina (Managed magnetic biasing shunt reactors/Edit by G.A. Evdokunin). St. Petersburg, Publ. «Rodnaya Ladoga», 2013, 280 p.

2. **Dolgopolov A.G., Kondratenko A.G., Ukolov S.V., Postalatii D.V.:** <http://cyberlenink.ru/article/n/upravlaemye-shuntiruyushchie-reactory-dla-elektricheskikh-setey>

3. **Spravochnik** po proektirovaniyu elektricheskikh system/Pod redaktsiyey D.A. Faibisovicha (Reference Design of electrical networks/Edit. By D.A. Faibisovich). Moscow. Publ. «ENAS», 2009, 392 p.

