Оценка эффективности применения фазоповоротного трансформатора для повышения пропускной способности электропередачи с учетом режима прилегающей сети

© В.П. Шойко, К.В. Духанина

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Резюме: Целью исследований явилась разработка мероприятий, направленных на повышение эффективности функционирования энергосистем, в частности, за счет повышения пропускной способности электропередач. Для решения указанной задачи использовалась FACTS-технология на основе фазоповоротного трансформатора. В работе применялась модель данного трансформатора с тиристорным коммутатором, разработанная в Энергетическом научно-исследовательском институте им. Г.М. Кржижановского. Исследование эффективности фазоповоротного трансформатора для повышения пропускной способности электропередач проводилось путем определения максимально допустимых перетоков сечения Барнаульско-Бийского узла-2. Расчеты выполнялись для нормальной и различных послеаварийных схем с использованием программного комплекса RastrWin3. При исследованиях учитывалось регулирование отпаяк фазоповоротного трансформатора, рассматривались различные места его установки. Показано, что для рассматриваемого сечения применение фазоповоротного трансформатора позволило увеличить максимально допустимый переток на 4–12%. Выявлено, что определяющим фактором, ограничивающим максимально допустимый переток в сечении Барнаульско-Бийского узла-2, является токовая перегрузка линий 110 кВ прилегающей сети. Причем наибольший эффект повышения максимально допустимого перетока имел место при установке фазоповоротного трансформатора не на линии 220 кВ, входящей в сечение, а на примыкающей к сечению линии 220 кВ, параллельной линиям 110 кВ, которые перегружались при утяжелении режима. Выполнены аналогичные расчеты для нормальной и послеаварийных схем альтернативного варианта, который предполагает замену проводов и установку автоматики ограничения перегрузки оборудования на перегружаемых линиях 110 кВ. Согласно проведенным исследованиям установлено, что эффект повышения пропускной способности этого варианта составил около 4%.

Ключевые слова: энергосистема, электропередача, фазоповоротный трансформатор, пропускная способность, максимально допустимый переток, сечение

Для цитирования: Шойко В.П., Духанина К.В. Оценка эффективности применения фазоповоротного трансформатора для повышения пропускной способности электропередачи с учетом режима прилегающей сети. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 3. С. 369–379. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-369-379>

Use of a phase-shifting transformer for increasing the power transmission capacity, taking into account the mode of the adjacent network

Vladimir P. Shoiko, Kseniya V. Dukhanina

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: In this research, we develop measures aimed at improving the efficiency of power systems by increasing their transmission capacity. To this end, a FACTS system based on the phase-shifting transformer with a thyristor switch developed at the Power Engineering Institute named after G.M. Krzhizhanovsky was used. The efficiency of the phase-shifting transformer under study for increasing the transmission capacity of power systems was determined by the maximum permissible cross-section flows of the Barnaul-Biysk node-2. The calculations were performed for normal and various post-accident schemes using the RastrWin3 software package. Such factors as the regulation of the taps of the phase-shifting transformer and various places of its installation were considered. For the section under consideration, the phase-shifting transformer increased the maximum permissible flow by 4–12%. The determining factor limiting the maximum permissible flow in the Barnaul-Biysk node-2 was found to be the current overload of the 110 kV lines of the adjacent network. The greatest effect of increasing the maximum permissible overflow was noted when the phase-shifting

transformer was installed on the 220 kV line adjacent to the section, parallel to the 110 kV lines (which were overloaded when the mode became heavier), rather than on the 220 kV line included in the section. Similar calculations were performed for normal and post-accident schemes of an alternative option, which involved replacing wires and installing automatic equipment for limiting equipment overload on overloaded 110 kV lines. The obtained results show that the effect of increasing the transmission capacity for this option comprised 4%.

Keywords: power system, power transmission, phase-shifting transformer, throughput capacity, maximum allowable flow, cross section

For citation: Shoiko VP, Dukhanina KV. Use of a phase-shifting transformer for increasing the power transmission capacity, taking into account the mode of the adjacent network. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(3):369–379. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-369-379>

ВВЕДЕНИЕ

Расширение возможностей управления процессами в электрических системах дает управление фазами режимных параметров, обуславливающих перераспределение активных и реактивных мощностей по элементам электропередачи. Теоретические и практические аспекты применения фазового управления решены в работах отечественных и зарубежных ученых: В.Г. Холмского, В.М. Чебана, А.Х. Калюжного, Ю.Г. Шакаряна, Дж. Вербумена и других исследователей¹ [1–5].

В настоящее время повышение эффективности функционирования энергосистем, в частности, повышение пропускной способности электропередач достигается применением FACTS-технологий (от англ. Flexible Alternative Current Transmission System). Основы FACTS-технологий изложены в работах [6, 7]. FACTS-технологии реализуются с помощью различных технических устройств. Одним из таких устройств является фазоповоротный трансформатор (ФПТ). Следует отметить, что ведущие зарубежные энергокомпании достигли большого прогресса в части внедрения ФПТ в энергосистемах. Представительный информационно-аналитический обзор по применению ФПТ в мире приведен в работе [8]. Там же отмечено, что опыт разработки и эксплуатации ФПТ – в первую очередь в таких странах как Великобритания, Франция, Бельгия, Нидерланды – убедительно свидетельствует об их эффективности.

Применение данной инновационной технологии в России и СНГ находится на начальном этапе. ФПТ впервые в СНГ применен в Казахстане в 2008 г. [9]. В России ввод в опытную эксплуатацию ФПТ состоялся в 2019 г.² [10]. Устройство, разработанное совместным предприятием «Силовые машины – Тошиба. Высоковольтные трансформаторы» обеспечило управляемое перераспределение потоков активной мощности между распределительными устройствами 500 и 220 кВ Волжской ГЭС, что позволило (при необходимости) выдать в энергосистему всю располагаемую мощность электростанции и гибко управлять нагрузкой линий электропередач. По результатам опытной эксплуатации «Русгидро» планирует сформировать перечень объектов, где будут применять ФПТ. При успешном завершении опытной эксплуатации «Системный оператор» также инициирует работы по широкому внедрению ФПТ в тех сегментах Единой национальной электрической сети (ЕНЭС) России, где их применение технологически и экономически целесообразно.

В настоящее время работы по применению ФПТ в энергосистемах ведутся как в нашей стране, так и за рубежом. Они касаются выбора мест установки ФПТ, алгоритмов их настройки [11–13]. К важным исследованиям можно отнести и такие исследования, в которых выполняется оценка эффективности ФПТ для повышения пропускной способности

¹Чебан В.М., Ландман А.К., Фишов А.Г. Управление режимами электроэнергетических систем в аварийных ситуациях: учеб. пособ. для электроэнергет. спец. вузов. М.: Изд-во «Высшая школа», 1990. 144 с.

²В России впервые введен в эксплуатацию фазоповоротный трансформатор [Электронный ресурс]. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2019/05/22/v-rossii-vpervye-vveden-v-ekspluatatsiyu-fazopovorotnyj-transformator/> (04.02.2021).

электропередач конкретных энергосистем [14, 15].

Учитывая вышесказанное, можно считать актуальной задачей определение целесообразных мест установки ФПТ для повышения пропускной способности электропередач.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

В связи с растущими потребностями в электрической энергии требуется вырабатывать и передавать по внутрисистемным и межсистемным линиям связи большие по величине мощности. Поскольку многие линии электропередач были построены давно и не были рассчитаны на такую перспективную нагрузку, зачастую возникают проблемы с недопустимостью передачи мощностей по линиям по условиям устойчивости, нежелательного снижения напряжения в отдельных узлах или из-за токовой перегрузки линий. Такие проблемы встречаются в Алтайской энергосистеме, которая является дефицитной и питается со стороны смежных энергосистем: российских, а также энергосистемы Казахстана.

Основными генерирующими объектами Алтайской энергосистемы являются следующие теплоэлектроцентрали (ТЭЦ): Барнаульская ТЭЦ-2 с установленной мощностью 275 МВт, Барнаульская ТЭЦ-3 с установленной мощностью 445 МВт, Бийская ТЭЦ с установленной мощностью 510 МВт и ТЭЦ АКЗХ с установленной мощностью 200 МВт.

Алтайская энергосистема содержит несколько установленных для управления электроэнергетическим режимом контролируемых сечений. Одним из основных сечений является Барнаульско-Бийский узел-2 (ББУ-2). В состав сечения ББУ-2 входят четыре линии электропередачи 220 кВ: Барнаульская – Власиха, Барнаульская – Чесноковская (1СШ), Шпагино (отпайка 1) – Чесноковская (2СШ), Шпагино (отпайка 2) – Чесноковская (1СШ) (рис. 1).

Элементы, входящие в состав контролируемого сечения, входят в состав транзита Беловская ГРЭС – Барнаульская – Иртышская. Данный транзит шунтирует связь 500 кВ между объединенными энергосистемами (ОЭС) Казахстана и ОЭС Сибири. При этом

по основной сети 500 кВ возможны режимы с перетоками «в Сибирь» или «в Казахстан». Направление перетока определяется суммарным перетоком по высоковольтным линиям (ВЛ) 500 кВ Барнаульская – Рубцовская и Экибастузская-1150 – Алтай.

На переток в исследуемом сечении влияют смежные энергосистемы: Новосибирская, Томская, Кузбасская и др. Наиболее влияющими энергосистемами являются избыточные Кузбасская, поскольку рассматриваемый транзит берет свое начало на Беловской ГРЭС, а также Красноярская, связанная с Алтайской энергосистемой через подстанцию Алтай, и энергосистема Казахстана. Избыток мощности со стороны ТЭЦ Алтайского коксохимического завода (АКХЗ) и Кузбасской энергосистемы передается по линиям 220 кВ: отпайки на подстанции (ПС) Шпагино – Чесноковская. Со стороны Красноярска и Казахстана переток активной мощности направляется в сторону линий 220 кВ Барнаульская – Власиха, Барнаульская – Чесноковская.

МОДЕЛЬ ФАЗОПОВОРОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

ФПТ предназначен для изменения угла фазового сдвига по концам линии, в которую он включен. В состав фазоповоротного устройства входит автотрансформатор, называемый в ФПТ «шунтовым», а также вольтодобавочный трансформатор, который обычно называют «сериесным». Изменяя напряжение на сериесной обмотке можно осуществлять поворот вектора суммарного напряжения в начале сети, и, следовательно, управлять углом между напряжениями в начале и конце линии, изменяя поток мощности, передаваемой по ней.

В работе использовалась модель ФПТ. Сам ФПТ с тиристорным коммутатором и его модель были разработаны в АО «ЭНИН». В работах [16–19] представлена схема фазоповоротного устройства, описаны принцип его работы и режимы управления тиристорным коммутатором. Получена взаимосвязь входного и выходного напряжения, которая описывается следующим выражением (на примере фазы А):

Рис. 1. Фрагмент сети, прилегающий к сечению ББУ-2
 Fig. 1. Fragment of the grid adjacent to the section of the Barnaul-Biysky node 2

$$\underline{U}_{A1} = \underline{U}_A \times e^{j \arctg(\varphi)}, \quad (1)$$

где $\underline{U}_A$ – вектор напряжения на входе фазоповоротного устройства; $\underline{U}_{A1}$ – вектор напряжения на выходе фазоповоротного устройства; $\varphi = -\frac{2 \times \sqrt{3} \times n_1 \times n_2 \times k}{1 - 3 \times (n_1 \times n_2 \times k)^2}$ – угловой сдвиг; n_1 – коэффициент трансформации серийного трансформатора; n_2 – коэффициент трансформации шунтового трансформатора; $k = \pm 1$ – число, противоположное по знаку номеру ступени регулирования.

Применив формулу Эйлера, можно записать выражение связи входного и выходного напряжений (1) в следующем виде:

$$\underline{U}_{A1} = \underline{U}_A \times (k_t + jk_i), \quad (2)$$

где $k_t = \cos(\varphi)$ – действительная часть комплексного коэффициента трансформации; $k_i = \sin(\varphi)$ – мнимая часть комплексного коэф-

фициента трансформации.

Представление выходного напряжения от напряжения на входе устройства в виде (2) удобно для расчета в программе RastrWin3, где ФПТ моделируется с помощью вещественной и мнимой частей коэффициента трансформации.

Выбранный ФПТ с шунтовым и серийным трансформаторами номинальной мощностью 104 МВА осуществляет сдвиг по фазе за счет переключения отпайки тиристорными коммутаторами. Устройство реализует сдвиг по фазе в диапазоне от -40° до $+40^\circ$ и содержит ± 15 отпайки.

При расчете следует учитывать изменение суммарного сопротивления трансформатора при изменении номера отпайки. Суммарное сопротивление трансформатора рассчитывается как сумма сопротивлений серийного и шунтового трансформаторов. Из каталожных данных сопротивление серийного трансформатора равно $X_{сер} = 6,67$ Ом. Со-

противление шунтового трансформатора $X_{шунт}$ приводится к напряжению серийного трансформатора и варьируется в зависимости от номера отпайки. В программном комплексе RastrWin3 сопротивление ФПТ прибавляется к сопротивлению линии электропередачи, в расщелку которой устанавливается устройство. В зависимости от номера отпайки суммарное сопротивление ФПТ изменяется от 6,73 Ом до 8,87 Ом в соответствии с табл. 1. Также в табл. 1 приведены расчетные значения коэффициентов трансформации.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ПЕРЕТОКОВ В СЕЧЕНИИ ББУ-2 БЕЗ ФАЗОВОРОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Исследования данной работы можно считать продолжением исследований, проведенных в работе [15]. В указанной работе были определены максимально допустимые перетоки (МДП) в сечении ББУ-2 с использованием ФПТ, разработанного в Энергетическом научно-исследовательском институте им. Г.М. Кржижановского (в настоящее время Акционерное общество «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского» (АО «ЭНИН»)). Повышение МДП достигалось путем загрузки недогруженной линии электропередачи (ЛЭП) 220 кВ Барнаулская – Чесноковская. При этом суммарный переток ак-

тивной мощности по ВЛ 500 кВ Барнаулская – Рубцовская и Экибастузская-1150 – Алтай был направлен в Сибирь. Принципиальным отличием рассматриваемого исследования является учет режима сети, прилегающей к сечению, а также рассмотрение различных мест установки ФПТ при направлении суммарного перетока активной мощности в Казахстан.

Расчеты по определению МДП выполнялись в соответствии с методическими указаниями по расчету устойчивости энергосистем [20]. МДП получен с использованием RastrWin3, в котором производилось пошаговое утяжеление режима в соответствии с заданной траекторией.

В исследуемой энергосистеме увеличение перетока в сечении ББУ-2 производилось путем разгрузки в дефицитной части до технологического минимума Барнаульских и Бийской ТЭЦ, загрузки со стороны избыточной части сечения ТЭЦ АКХЗ, а также Кемеровских ТЭЦ, ГРЭС, Ново-Кемеровской ТЭЦ, Беловской ГРЭС, Южно-Кузбасской ГРЭС, Красноярской Берёзовской ГРЭС и Казахстанской Евроазиатской энергетической корпорации. Также осуществлялось уменьшение нагрузки в узлах вблизи ТЭЦ АКХЗ. Производилось регулирование отпайки автотрансформаторов Алтайской энергосистемы для получения максимально допустимого перетока.

Таблица 1. Результаты расчета сопротивлений и коэффициентов трансформации в зависимости от номера отпайки
Table 1. Results of calculating resistances and transformation ratios depending on the tap number

№ отп	$X_{шунт}$, Ом	$X_{сер}$, Ом	X_{Σ} , Ом	K_t	K_i	φ , °
±1	0,055	6,676	6,73	0,999	±0,0463	2,654
±2	0,147	6,676	6,82	0,996	±0,0924	5,304
±3	0,333	6,676	7,01	0,990	±0,1382	7,950
±4	0,320	6,676	7,00	0,983	±0,1836	10,586
±5	0,480	6,676	7,16	0,974	±0,2284	13,212
±6	0,708	6,676	7,38	0,962	±0,2725	15,823
±7	0,993	6,676	7,67	0,949	±0,3158	18,419
±8	1,216	6,676	7,89	0,934	±0,3581	20,995
±9	1,211	6,676	7,89	0,917	±0,3994	23,550
±10	1,269	6,676	7,95	0,898	±0,4394	26,082
±11	1,397	6,676	8,07	0,878	±0,4783	28,587
±12	1,683	6,676	8,36	0,857	±0,5158	31,066
±13	1,775	6,676	8,45	0,834	±0,5519	33,515
±14	1,965	6,676	8,64	0,810	±0,5866	35,933
±15	2,192	6,676	8,87	0,785	±0,6198	38,318

В работе рассматривались 3 основных режима:

- 1) нормальный;
- 2) с отключением ЛЭП 220 кВ ТЭЦ АКХЗ – Чесноковская с отпайкой на Шпагино (послеаварийный);
- 3) с отключением ЛЭП 220 кВ Барнаульская – Власиха (послеаварийный).

Согласно методическим указаниям по устойчивости³ [20], выделяют три основных фактора, ограничивающих МДП в сечении: нарушение требований по обеспечению коэффициента запаса по статической устойчивости для нормальной и послеаварийной схем, недопустимое снижение напряжения в узлах нагрузки, а также недопустимая перегрузка по току ЛЭП.

В рассмотренных режимах основным фактором, ограничивающим МДП, являлась токовая загрузка линий 110 кВ Чесноковская – Опорная с отпайкой на Береговую, Дмитротитовская – Кытмановская. При этом МДП определялся из известного соотношения:

$$P_M = P_{д/ав}(I_{п/ав}^{доп}) - \Delta P_{нк} + \Delta P_{ПА}, \quad (3)$$

где $I_{п/ав}^{доп}$ – аварийно допустимая токовая нагрузка ЛЭП; $P_{д/ав}(I_{п/ав}^{доп})$ – переток активной мощности в контролируемом сечении в доаварийной схеме, соответствующий аварийно допустимой токовой нагрузке ЛЭП; $\Delta P_{нк}$ – амплитуда нерегулярных колебаний активной мощности в контролируемом сечении; $\Delta P_{ПА}$ – приращение допустимого перетока активной мощности в контролируемом сечении за счет реализации управляющих воздействий от устройств противоаварийной автоматики (ПА).

В расчетах $\Delta P_{нк}$ принималась равной 25 МВт, действие ПА по повышению МДП не оценивалось.

Для повышения МДП предложен вариант с заменой проводов перегружаемых двухцепных ЛЭП 110 кВ Чесноковская – Опорная с отпайкой на Береговую и с установкой автоматики ограничения перегрузки оборудования (АОПО) на ЛЭП 110 кВ ТЭЦ АКХЗ – Дмитротитовская с отпайкой на Камышенскую (рис. 1). Выполнялась замена проводов марки АС-240 на АС-300. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчета максимально допустимых перетоков в сечении ББУ-2 без применения фазоповоротного трансформатора, МВт

Table 2. Results of calculating maximum allowable flows in the Barnaul-Biysky node 2 section with an idle phase-shifting transformer, MW

Режим \ Схема	Исходная схема	Замена проводов на линии электропередачи Чесноковская – Опорная с установкой автоматики ограничения перегрузки оборудования на линии электропередачи теплоэлектроцентрали Алтайского коксохимического завода – Дмитротитовская	Повышение максимально допустимых перетоков, %
Нормальный	700	727	3,86
Послеаварийный (отключение линии электропередачи 220 кВ Чесноковская – теплоэлектроцентрали Алтайского коксохимического завода)	672	699	4,02
Послеаварийный (отключение линии электропередачи 220 кВ Барнаульская – Власиха)	696	722	3,74

³ Методические указания по устойчивости энергосистем [Электронный ресурс]. URL: <https://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/orders/pr630-030818me.pdf> (04.02.2021).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ПЕРЕТОКОВ В СЕЧЕНИИ ББУ-2 С ФАЗОВОПОВОРОТНЫМ ТРАНСФОРМАТОРОМ

При исследованиях рассматривались два места установки ФПТ: в рассечку линии Барнаулская – Чесноковская или в рассечку линии Чесноковская – Троицкая. Определялись МДП при различных отпайках ФПТ. Расчеты

выполнялись путем установки на ФПТ определенной отпайки и последующего утяжеления режима по появления фактора, ограничивающего переток в сечении. Результаты исследований приведены на рис. 2–4 и в табл. 3. При номерах отпайки больше крайних, приведенных на соответствующих рисунках, наступала неустраняемая перегрузка по току линии, где установлен сам ФПТ.

Рис. 2. Эффективность фазоповоротного трансформатора в нормальном режиме
Fig. 2. Efficiency of the phase-shifting transformer in the normal mode

Рис. 3. Эффективность фазоповоротного трансформатора в послеаварийном режиме (отключение линии Чесноковская – теплоэлектроцентрали Алтайского коксохимического завода)
Fig. 3. Efficiency of the phase-shifting transformer in the post-emergency mode (disconnected Chesnokovskaya – cogeneration plant of Altai Coke Plant line)

Рис. 4. Эффективность фазоповоротного трансформатора в послеаварийном режиме (отключение линии Барнаулская – Власиха)

Fig. 4. Efficiency of the phase-shifting transformer in the post-emergency mode (disconnected Barnaulskaya – Vlasikha line)

Таблица 3. Результаты расчета максимально допустимых перетоков в сечении ББУ-2 с применением фазоповоротного трансформатора, МВт

Table 3. Results of calculating maximum allowable flows in the Barnaul-Biysky node 2 section using a phase-shifting transformer, MW

Режим Схема	Исходная схема	Фазоповоротный трансформатор в линии электропередачи 220 Барнаулская – Чесноковская	Повышение максимально допустимых перетоков, %	Фазоповоротный трансформатор в линии электропередачи 220 Чесноковская – Троицкая	Повышение максимально допустимых перетоков, %
Нормальный	700	730	4,29	759	8,43
Послеаварийный (отключение электропередачи Чесноковская – теплоэлектроцентрали Алтайского коксохимического завода)	672	702	4,46	751	11,76
Послеаварийный (отключение линии электропередачи Барнаулская – Власиха)	696	727	4,45	781	12,21

При установке ФПТ в рассечку линии 220 кВ Барнаулская – Чесноковская в нормальном и послеаварийном режимах при отключении ЛЭП 220 кВ Барнаулская – Власиха основным фактором, ограничивающим МДП, являлась токовая перегрузка линии 110 кВ Дмитротитовская – Кытмановская. В послеаварийном режиме при отключении ЛЭП 220 кВ ТЭЦ АКХЗ – Чесноковская дополнительно имела место перегрузка по току участка ЛЭП 220 кВ Смазнево – отпайка на Шпагино.

При установке ФПТ в рассечку линии 220

кВ Чесноковская – Троицкая в нормальном и послеаварийном режимах при отключении ЛЭП 220 кВ Барнаулская – Власиха основным фактором, ограничивающим МДП, являлась токовая перегрузка линий 110 кВ Чесноковская – Опорная с отпайкой на Береговую. В послеаварийном режиме при отключении ЛЭП 220 кВ ТЭЦ АКХЗ – Чесноковская МДП ограничивался токовой перегрузкой линии 110 кВ Дмитротитовская – Кытмановская и/или участка ЛЭП 220 кВ Смазнево – отпайка на Шпагино.

Наибольший эффект повышения МДП был получен при установке ФПТ с линии 220 кВ Чесноковская – Троицкая в послеаварийном режиме при отключении ЛЭП 220 кВ Барнаульская – Власиха. Это связано с тем, что ФПТ перераспределит мощность, отходящую от шин ПС 220 кВ Чесноковская, разгрузив перегружаемые линии 110 кВ Чесноковская – Опорная с отпайкой на Береговую и загрузив линию 220 кВ Чесноковская – Троицкая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Опыт разработки и эксплуатации ФПТ в зарубежных энергокомпаниях убедительно свидетельствует об их эффективности. В России данная инновационная технология впервые применена на Волжской ГЭС. По результатам опытной эксплуатации «Русгидро» на своих объектах и «Системный оператор» в сегментах ЕНЭС России планируют внедрение ФПТ, где их применение технологически и экономически целесообразно.

2. Проведенные исследования выявили одно из мест целесообразной установки ФПТ для повышения пропускной способности электропередачи – сечение Барнаульско-Бийского узла-2. Для рассматриваемого сечения применение ФПТ позволило увеличить МДП на 4–12%.

3. Выявлено, что определяющим фактором, ограничивающим МДП в сечении ББУ-2, является токовая перегрузка линий 110 кВ прилегающей сети. Причем наибольший эффект повышения МДП имел место при установке ФПТ не на линии 220 кВ, входящей в сечение, а на примыкающей к сечению линии 220 кВ, параллельной линиям 110 кВ, которые перегружались при утяжелении режима.

4. Предложен альтернативный вариант – замена проводов и установка АОПО на перегружаемых линиях 110 кВ. Для этого варианта выполнены аналогичные расчеты по определению МДП для нормальной и послеаварийных схем. Эффект повышения пропускной способности составил около 4%.

Список литературы

1. Холмский В.Г. Применение регулируемых трансформаторов. М.: Госэнергоиздат, 1950. 152 с.
2. Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н., Ситников В.Ф. Демпфирование колебаний перетоков мощности с помощью устройств FACTS с управляющими системами на основе модального синтеза // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2001. Вып. 3. С. 43–47.
3. Бушуев В.В., Калужный А.Х., Кречмер Л.В., Шушуев А.А. Применение фазоповоротных устройств для упрощения потокораспределения в энергосистемах // Электричество. 1990. № 11. С. 6–11.
4. Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Режимы работы управляемых линий электропередачи // Электричество. 1997. № 9. С. 3–8.
5. Стельмаков В.Н., Жмуров В.П., Тарасов А.Н., Гринштейн Б.И., Тузлукова Е.В. Фазоповоротные устройства с тиристорным управлением // Энергетик. 2010. № 8. С. 20–23.
6. Hingorani N.G., Gyugui L. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible ac transmission systems. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999. 452 p. <https://doi.org/10.1002/9780470546802>
7. Мисриханов М.Ш., Рябченко В.К., Ситников В.Ф. Основы технологии FACTS // Электро-Info. 2007. № 12. С. 61–69.
8. Добрусин Л.А. Проблемы энергоэффективности и энергосбережения в России. Информационно-аналитический обзор. Часть III. Тенденции применения фазоповоротных трансформаторов в электроэнергетике // Силовая электроника. 2012. № 4. С. 60–66.
9. Евдокунин Г., Николаев Р., Исаков А., Оспанов Б., Утегулов Н. Фазоповоротный трансформатор впервые в СНГ применен в Казахстане // Новости электротехники. 2008. № 6. С. 12–16.
10. Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф., Тузлукова Е.В., Хвоцинская З.Г., Злобина М.А., Иващенко Т.Е. Возможность применения фазоповоротных устройств в ЕНЭС России // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2005. Вып. 5. С. 42–44.
11. Акимов Д.А., Коровкин Н.В., Одинцов М.В., Фролов О.В. Методика выбора мест установки и параметров фазоповоротных трансформаторов в электрических сетях // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2016. № 74. С. 6–19.
12. Акимов Д.А., Гладышев О.Я., Борисов П.С. Усовершенствование методики выбора мест установки и углов регулирования фазоповоротных трансформаторов // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2016. № 75. С. 67–74.
13. Wolfram M., Marten A.-K., Westermann D. A comparative study of evolutionary algorithms for phase shifting transformer setting optimization // IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). 2016. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2016.7514056>
14. Воденников Д.А. Применение фазоповоротного

устройства для увеличения пропускной способности электрической сети // Вестник Московского энергетического института. 2020. № 3. С. 75–80.

<https://doi.org/10.24160/1993-6982-2020-3-75-80>

15. Ставицкий С.А., Шестакова В.В. Применение фазоповоротного устройства в Алтайской энергосистеме // Интеллектуальные энергосистемы: тр. IV Междунар. молодёж. форума: в 3 т. (г. Томск, 10–14 октября 2016 г.). Томск: Изд-во ТПУ, 2016. Т. 2. С. 324–327.

16. Стельмаков В.Н., Жмуров В.П., Тарасов А.Н., Гринштейн Б.И., Тузлукова Е.В. Фазоповоротные устройства с тиристорным управлением // Энергетик. 2010. № 8. С. 20–23.

17. Рашитов П.А., Ремизевич Т.В. Особенности управления полупроводниковым ФПУ со средней точкой // Силовая электроника. 2011. № 1. С. 78–82.

18. Панфилов Д.И., Рашитов П.А., Ремизевич Т.В., Федорова М.И. Расширение зоны управляемости полупроводниковых фазоповоротных устройств средствами алгоритмов управления тиристорным коммутатором // Динамика нелинейных дискретных электро-механических и электронных систем: матер. XI Всеросс. науч. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. С. 286–289.

19. Ахметов И.М., Лачугин В.Ф. Диагностика состояния фазоповоротного устройства с тиристорным коммутатором // Известия вузов. Электромеханика. 2015. № 1. С. 16–20. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2015-1-16-20>

20. Асташев М.Г., Панфилов Д.И. Фазоповоротные устройства с тиристорными коммутаторами для активно-адаптивных электрических сетей // Электричество. 2013. № 8. С. 60–65.

References

1. Kholmsky VG. *The use of regulated transformers*. Moscow: Gosenergoizdat; 1950, 152 p. (In Russ.)

2. Misrihanov MSh, Ryabchenko VN, Sitnikov VF. Damping fluctuations in power flows using FACTS devices with control systems based on modal synthesis. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*. 2001;3:43–47. (In Russ.)

3. Bushuev VV, Kalyuzhny AKh, Krechmer LV, Shushuev AA. Use of phase-shifting devices to simplify flow distribution in power systems. *Elektrichestvo*. 1990;11:6–11. (In Russ.)

4. Kochkin VI, Shakaryan YuG. Operating condition of controlled power transmission lines. *Elektrichestvo*. 1997;9:3–8. (In Russ.)

5. Stel'makov VN, Zhmurov VP, Tarasov AN, Grinshtejn BI, Tuzlukova EV. Phase-shifting devices with thyristor control. *Energetik*. 2010;8:20–23. (In Russ.)

6. Hingorani NG, Gyugui L. *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers; 1999, 452 p. <https://doi.org/10.1002/9780470546802>

7. Misrihanov MSh, Ryabchenko VK, Sitnikov VF. *Fundamentals of FACTS technology*. *Elektro-Info*. 2007;12:61–69. (In Russ.)

8. Dobrusin LA. Energy efficiency and energy saving problems in Russia. Information and analytical review. Part III. Application trends of phase-shifting transformers in electric power industry. *Silovaya elektronika*. 2012;4:60–66. (In Russ.)

9. Evdokunin G, Nikolaev R, Isakov A, Ospanov B, Utegulov N. Kazakhstan is the first in the CIS to use a phase-shifting transformer. *Novosti elektrotehniki*. 2008;6:12–16. (In Russ.)

10. Misrihanov MSh, Sitnikov VF, Tuzlukova EV, Hvoshchinskaya ZG, Zlobina MA, Ivashchenko TE. Possibilities to use phase-shifting devices in the Unified National All-Russian Grid. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*. 2005;5:42–44. (In Russ.)

11. Akimov DA, Korovkin NV, Odintsov MV, Frolov OV. The method of choosing the placement and parameters of

phase-shifting transformers. *Izvestiya NTC edinoj energeticheskoy sistemi = STC of Unified Power System Proceedings*. 2016;74:6–19. (In Russ.)

12. Akimov DA, Gladyshev OY, Borisov PS. The phase-shifting transformers placement and settings choice method development. *Izvestiya NTC edinoj energeticheskoy sistemi = STC of Unified Power System Proceedings*. 2016;75:67–74. (In Russ.)

13. Wolfram M, Marten A-K, Westermann D. A comparative study of evolutionary algorithms for phase shifting transformer setting optimization. In: *IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*. 2016. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2016.7514056>

14. Vodennikov DA. Application of a phase-shifting device for increasing the grid transmission capacity. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*. 2020;3:75–80. (In Russ.) <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2020-3-75-80>.

15. Stavickij SA, Shestakova VV. Application of a phase-shifting device in the Altai power system. *Intellektual'nye energosistemy: trudy IV Mezhdunarodnogo molodyozhnogo foruma = Intelligent power systems: Proceedings of IV International Youth Forum: in 3 volumes*. 10–14 October 2016, Tomsk. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2016, vol. 2, p. 324–327. (In Russ.)

16. Stel'makov VN, Zhmurov VP, Tarasov AN, Grinshtejn BI, Tuzlukova EV. Thyristor- controlled phase-shifting devices. *Energetik*. 2010;8:20–23. (In Russ.)

17. Rashitov PA, Remizevich TV. Control features of semiconductor phase-shifting devices with a midpoint. *Silovaya elektronika*. 2011;1:78–82. (In Russ.)

18. Panfilov DI, Rashitov PA, Remizevich TV, Fedorova MI. Advancing the controllability zone of semiconductor phase-shifting devices by means of thyristor switch control algorithms. In: *Dinamika nelinejnyh diskretnykh elektromekhanicheskikh i elektronnykh sistem: materialy XI Vserossijskoj nauchnoj konferencii = Dynamics of nonlinear discrete electromechanical and electronic systems: Proceedings of XI All-Russian scientific conference*. Cheboksary: Chuvash University Publishing House. 2015, p. 286–289. (In Russ.)

19. Akhmetov IM, Lachugin VF. Diagnostics of phase-shifting device with thyristor switch. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika = Scientific and Technical Journal. Russian Electromechanics*. 2015;1:16–20. (In Russ.)

<https://doi.org/10.17213/0136-3360-2015-1-16-20>
20. Astashev MG, Panfilov DI. Phase-shifting devices with thyristor switches for active-adaptive electrical networks. *Elektrichestvo*. 2013;8:60–65. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шойко Владимир Петрович,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Автоматизированные
электроэнергетические системы»,
Новосибирский государственный технический
университет,
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия;
✉ e-mail: shoiko@ngs.ru

Духанина Ксения Владимировна,
магистрант,
Новосибирский государственный технический
университет,
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия;
e-mail: duhanina.aksinja@yandex.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 26.04.2021; одобрена после рецензирования 28.05.2021; принята к публикации 30.06.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir P. Shoiko,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Automated
Electric Power Systems,
Novosibirsk State Technical University,
20 K. Marx Ave., Novosibirsk 630073, Russia,
✉ e-mail: shoiko@ngs.ru

Kseniya V. Dukhanina,
Master's Degree Student,
Novosibirsk State Technical University,
20 K. Marx Ave., Novosibirsk 630073, Russia,
e-mail: duhanina.aksinja@yandex.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 26.04.2021; approved after reviewing 28.05.2021; accepted for publication 30.06.2021.