

УДК 621.311

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-3-75-80

Применение фазопоротного устройства для увеличения пропускной способности электрической сети

Д.А. Воденников

В настоящее время проблема повышения эффективности функционирования развитых электроэнергетических систем решается за счёт активного внедрения и развития технологий активно-адаптивных электрических сетей (Smart Grid, FACTS — Flexible Alternative Current Transmission Systems). Технологии FACTS позволяют управлять потоками мощностей в крупных распределительных сетях, за счёт чего повышается эффективность использования межсистемных связей, оптимизируется загрузка энергетического оборудования и, в целом, повышается экономичность распределения электроэнергии. Одними из элементов FACTS являются фазопоротные трансформаторы (ФПТ) и фазопоротные устройства (ФПУ), помогающие руководить потоками электрической энергии за счёт создания дополнительного фазового сдвига между шинами устройства в месте его установки. Наиболее широко распространены ФПТ, регулирование фазового сдвига которых осуществляется механическим способом с помощью регулирования под нагрузкой (РПН). Рассмотрено ФПУ с тиристорным коммутатором, разработанное НИИ им. Г.М. Кржижановского. Использованы материалы научных исследований и разработок, методы математического моделирования, проводимого в RastrWin3. Продемонстрирована возможность применения ФПУ с тиристорным коммутатором для увеличения величины допустимых перетоков в контролируемом сечении «Донская — Старый Оскол». Показано, что для рассматриваемого сечения величина допустимых перетоков увеличивается на 4...7% в различных ремонтных схемах

Для определения оптимального места установки и настроек ФПУ следует использовать ряд критериев, таких как снятие токовой перегрузки элементов системы, повышение допустимых перетоков в сечениях, снижение потерь, повышение статической и динамической устойчивости и др.

Ключевые слова: FACTS, Smart Grid, активно-адаптивные сети, фазопоротное устройство.

Для цитирования: Воденников Д.А. Применение фазопоротного устройства для увеличения пропускной способности электрической сети // Вестник МЭИ. 2020. № 3. С. 75—80. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-3-75-80.

Application of a Phase Shifting Device for Increasing the Grid Transmission Capacity

D.A. Vodennikov

At present, the problem of improving the performance of advanced electric power systems is solved by actively introducing and developing the technologies of active-adaptive electric networks like Smart Grid or Flexible AC Transmission Systems (FACTS). By using the FACTS technologies, it becomes possible to control power flows in large distribution networks, due to which inter-area ties are used more efficiently, the power equipment loading is optimized, and the distribution of electricity becomes on the whole more economically efficient. Phase shifting transformers (PSTs) and phase shifting devices (PSDs), which allow electric power flows to be controlled by making an additional phase shift between the device busbars at its connection point, are among the FACTS elements. PSTs, the phase shift in which is adjusted mechanically using the on-load tap changer (OLTC), are the most widely used phase shifting apparatuses. The PSD equipped with a thyristor switching system developed at the Krzhizhanovsky Energy Research Institute is considered.

Materials of scientific research and development works and methods of the mathematical modeling carried out in the RastrWin3 software environment were used.

The possibility of using the PSD equipped with a thyristor switching system for increasing the permissible power flows in the controlled Donskaya - Staryi Oskol section has been demonstrated. It has been shown that the permissible power flows for the considered section can be increased by 4–7% in different repair configurations.

For determining the optimal PSD connection point and its settings, it is recommended to use a number of criteria, such as relieving the current overload of system elements, increasing the permissible power flows through sections, decreasing the losses, increasing the steady-state and transient stability, and others.

Key words: FACTS, Smart Grid, active-adaptive grids, phase shifting device.

For citation: Vodennikov D.A. Application of a Phase Shifting Device for Increasing the Grid Transmission Capacity. Bulletin of MPEI. 2020;3:75—80. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-3-75-80.

Введение

Одна из наиболее актуальных задач мировой и Российской электроэнергетики — проблема управления потоками электроэнергии в сложных электрических системах (ЭС). Принудительное перераспределение потоков электроэнергии в ЭС позволяет решать вопросы перегрузки одних транзитных линий при недогрузке других, снижения транспортных потерь активной мощности, повышения устойчивости, увеличения величин допустимых перетоков в сечениях. Процесс управления потоками электроэнергии протекает за счёт применения устройств и технологий активно-адаптивных электрических сетей (Smart Grid, FACTS — Flexible Alternative Current Systems) [1]. Элементами FACTS являются фазоворотные трансформаторы (ФПТ) и устройства (ФПУ).

Математическая модель

ФПТ и ФПУ позволяют решать задачу перераспределения потоков электрической энергии в электрических сетях, а также ряд других проблем за счёт создания дополнительной продольной комплексной вольтодобавки в месте установки устройства [1, 2].

В общем случае ФПТ и ФПУ состоят из двух трансформаторов, включенных параллельно и последовательно в ЛЭП. Изменение фазового сдвига на выходе устройства достигается переключением различного числа секций вторичных обмоток шунтового (параллельного) трансформатора к первичным обмоткам серийного (последовательного) трансформатора. Простейший способ переключения (регулирования) —

использование устройств регулирования под нагрузкой (РПН) [2 — 6].

Рассмотрено применение ФПУ с тиристорным коммутатором [1], основной особенностью которого является повышенное быстродействие и надёжность за счёт применения тиристорного коммутатора вместо электромеханического РПН, созданного АО «ЭНИН» им. Г.М. Кржижановского [7]. Структурная схема устройства дана на рис. 1.

Схема замещения ФПУ для расчёта установившихся режимов представляет собой последовательно включённое реактивное сопротивление и комплексный коэффициент трансформации (K_T), модуль которого равен единице (рис. 2). Активное сопротивление для расчёта нормальных установившихся режимов равно нулю.

Значения комплексного коэффициента трансформации и реактивного сопротивления ФПУ зависят от положения регулирующего устройства (табл. 1). Длительно допустимый ток ФПУ составляет 787 А, допустимая токовая перегрузка — 20% в течение 20 мин.

Вычислительный эксперимент

Проанализирована возможность применения ФПУ для увеличения величин допустимых перетоков в контролируемом сечении «Донская — Старый Оскол». В состав контролируемого сечения входит ВЛ 500 кВ Донская — Старый Оскол № 1. Критерий определения допустимых перетоков — аварийно-допустимая токовая нагрузка (АДТН) шунтирующих связей: ВЛ 110 кВ Алексеевка — Острогожск-районная I и II цепи, ВЛ

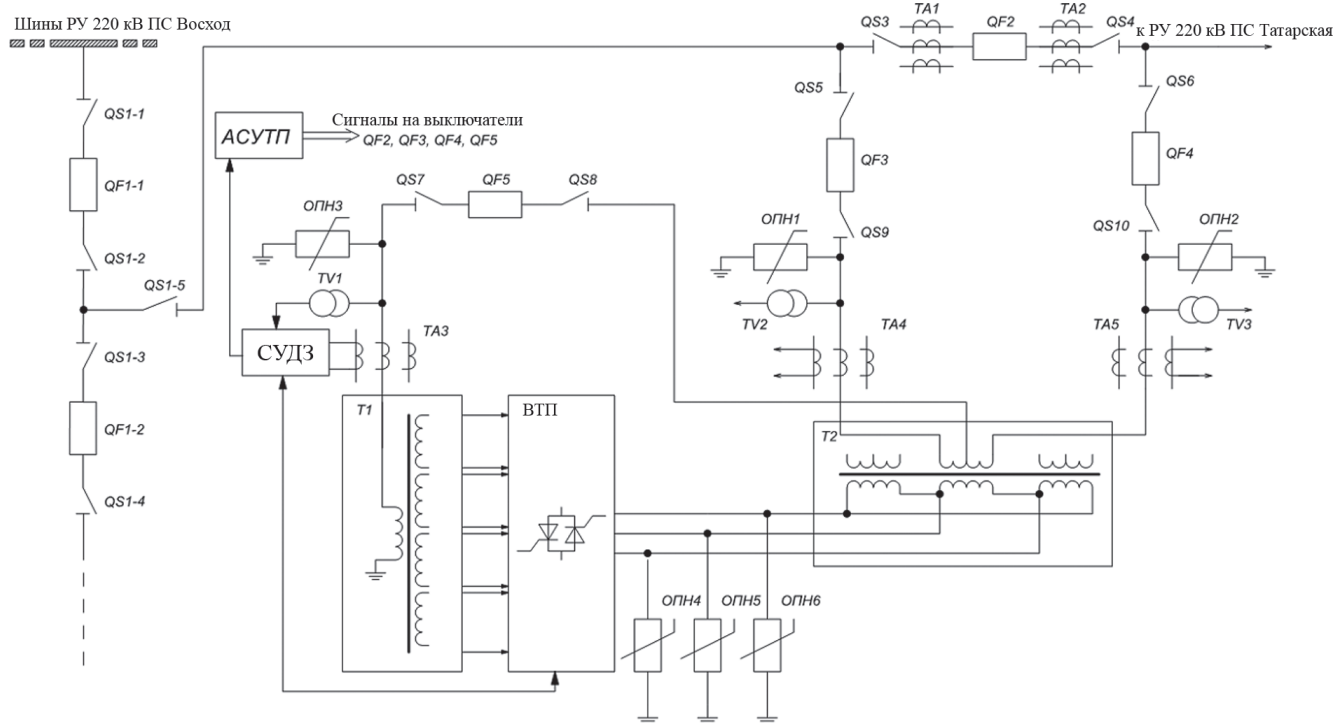


Рис. 1. Однолинейная схема включения ФПУ с тиристорным коммутатором

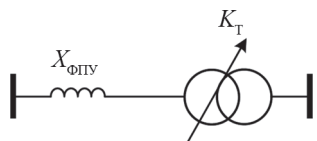


Рис. 2. Схема замещения ФПУ для расчёта УР

110 кВ Нововоронежская АЭС — Лиски-тяговая № 1, 2 с отпайками, а также АТ-1, 2-200 220/110 кВ ПС 330 кВ Лиски (рис. 3). Сечение контролируется при перетоках в сторону ПС 500 кВ Старый Оскол.

Схема сети Воронежской энергосистемы, входящей в ОЭС Центра, имеет довольно сложную топологию с большим количеством шунтирующих связей. Для того, чтобы разгрузить самый слабый участок транзита 110 кВ от ПС 330 кВ Лиски до ПС 330 кВ Валуйки, в составе которого ВЛ 110 кВ Алексеевка — Острогожск-районная I и II цепи, необходимо установить ФПУ на ВЛ 220 кВ Лиски — Бобров. Регулируя угол по ВЛ 220 кВ Лиски — Бобров можно загружать указанную линию, перераспределяя тем самым потоки мощности на другие участки сети и разгружая проблемное оборудование. При этом следует следить за токовой загрузкой смежных элементов, не допуская их перегрузки.

Для определения технического эффекта предлагаемого мероприятия проведена серия расчётов установившихся режимов в программе RastrWin3 для различных ремонтных схем. Выявлено увеличение допустимого перетока на величину до 7% в тех схемах, где критерием определения стали АДТН ВЛ 110 кВ Алексеевка для различных ремонтных схем Острогожск-районная I и II цепи, а также ВЛ 110 кВ Нововоронежская АЭС — Лиски-тяговая №1, 2 с отпайками.

Таблица 1

Параметры устройства в зависимости от положения регулятора

Отпайка	Градус	X
1	20,0000	20,48
2	18,6667	19,55
3	17,3333	18,86
4	16,0000	18,32
5	14,6667	17,49
6	13,3333	16,85
7	12,0000	16,57
8	10,6667	16,31
9	9,3333	16,93
10	8,0000	15,83
11	6,6667	15,03
12	5,3333	14,33
13	4,0000	14,34
14	2,6667	13,53
15	1,3333	13,13
16	0,0000	12,73
17	-1,3333	13,13
18	-2,6667	13,53
19	-4,0000	14,34
20	-5,3333	14,33
21	-6,6667	15,03
22	-8,0000	15,83
23	-9,3333	16,93
24	-10,6667	16,31
25	-12,0000	16,57
26	-13,3333	16,85
27	-14,6667	17,49
28	-16,0000	18,32
29	-17,3333	18,86
30	-18,6667	19,55
31	-20,0000	20,48

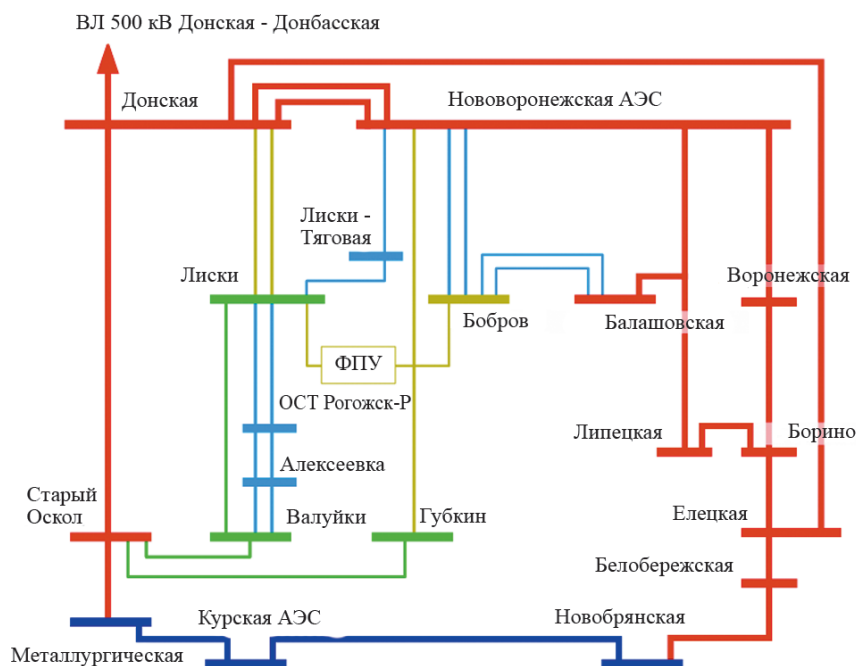


Рис. 3. Упрощённая схема рассматриваемого участка сети

Описание ремонтных схем, для которых велся поиск величины допустимого перетока.

Схема 1. Отключена ВЛ 330 кВ Лиски — Валуйки при введенной в работу АОПО ВЛ 220 кВ Нововоронежская АЭС — Губкин, действующей на отключение данной линии. Критерием определения допустимого перетока является АДТН ВЛ 110 кВ Алексеевка — Острогожск-районная I, II цепи при отключении ВЛ 500 кВ Донская — Старый Оскол № 1. Применение ФПУ позволяет увеличить допустимый переток по сечению на 6,5% (табл. 2).

Схема 2. Отключены ВЛ 330 кВ Лиски — Валуйки и АТ-1(2) 500/220 кВ ПС Донская при введенной в работу АОПО ВЛ 220 кВ Нововоронежская АЭС — Губкин. Критерием определения допустимого перетока стала

АДТН ВЛ 110 кВ Алексеевка — Острогожск-районная I, II цепи. Применение ФПУ увеличивает допустимый переток по сечению на 7%.

Схема 3. Отключены ВЛ 330 кВ Лиски — Валуйки и ВЛ 220 кВ Нововоронежская АЭС — Губкин. Критерий определения допустимого перетока — АДТН ВЛ 110 кВ Алексеевка — Острогожск-районная I, II цепи. Фисируется рост допустимого перетока по сечению на 5%.

Схема 4. Отключены ВЛ 330 кВ Лиски — Валуйки и ВЛ 220 кВ Нововоронежская АЭС — Губкин и АТ-1(2) 500/220 кВ ПС Донская. Критерий определения допустимого перетока — АДТН ВЛ 110 кВ Алексеевка — Острогожск-районная I, II цепи. Применение ФПУ позволяет повысить допустимый переток по сечению на 7%.

Таблица 2

Результаты расчетов

Номер схемы	ТНВ, °С	ДП без ФПУ, МВт	ДП с ФПУ, МВт	Δ, %
1	≤ 5	970	1030	6,5
	10	940	1000	
	15	900	960	
	20	860	915	
	25	820	875	
	30	770	820	
2	≤ 5	1000	1070	7,0
	10	980	1045	
	15	940	1005	
	20	900	960	
	25	860	920	
	30	810	865	
3	≤ 5	1070	1120	5,0
	10	1040	1090	
	15	1000	1045	
	20	960	1005	
	25	920	965	
	30	870	910	
4	≤ 5	1100	1175	7,0
	10	1080	1155	
	15	1040	1110	
	20	1000	1065	
	25	960	1025	
	30	910	970	
5	≤ 15	790	820	4,0
	20	770	800	
	25	710	735	
	30	640	665	
	35	560	580	
6	≤ 20	860	890	4,0
	25	830	860	
	30	760	790	
	35	680	705	

Схема 5. Отключены ВЛ 220 кВ Донская — Лиски № 1 и ВЛ 220 кВ Донская — Лиски № 2. Критерий определения допустимого перетока — АДТН ВЛ 110 кВ Нововоронежская АЭС — Лиски-тяговая № 1, 2 с отпайками. Применение ФПУ увеличивает допустимый переток по сечению на 4%.

Схема 6. Отключены ВЛ 220 кВ Донская — Лиски № 1 и ВЛ 220 кВ Донская — Лиски № 2, разомкнут двухцепный транзит 110 кВ Лиски — Острогжск-районная — Алексеевка. Критерий определения допустимого перетока — АДТН ВЛ 110 кВ Нововоронежская АЭС — Лиски-тяговая № 1, 2 с отпайками. Применение ФПУ позволяет допустимому перетоку вырасти по сечению на 4%.

В остальных ремонтных схемах сечения, связанных с отключением одной из ВЛ 220 кВ Донская — Лиски № 1 (2) с выполнением схемы деления (отключены СВ 220 кВ ПС 330 кВ Лиски и АТ-2(1) 330/220 кВ ПС 330 кВ Лиски и АТ-1(2) 500/220 кВ ПС 500 кВ Донская), регулирование перетока активной мощности по ВЛ 220 кВ Лиски — Бобров не приводит к увеличению МДП, так как при разгрузке одних элементов (ВЛ 110 кВ Нововоронежская АЭС — Лиски-тяговая № 1, 2 с отпайками) происходит перегрузка других (АТ-1, 3 Нововоронежской АЭС, АТ-1,2-200 220/110 кВ ПС 330 кВ Лиски). В подобных случаях необходимо шунтирование устройства для вывода его из работы.

Заключение

Продемонстрирована возможность применения фазоповоротного устройства с тиристорным комму-

татором для увеличения допустимых перетоков в контролируемом сечении «Донская — Старый Оскол». Показано, что оно позволяет решить задачу перераспределения потоков электрической энергии в сложных системах с большим количеством шунтирующих связей на примере участка сети Воронежской энергосистемы, входящей в ОЭС Центра. Для оценки эффективности применения фазоповоротных устройств использованы математические модели энергосистемы и фазоповоротного устройства в ПК RastrWin. Расчёты проходили в расчётной модели, сформированной по результатам контрольных измерений на час максимума нагрузок.

Проведенные вычисления установившихся режимов показали, что для рассматриваемого сечения величина допустимых перетоков увеличивается на 4...7% в различных ремонтных схемах при использовании ФПУ для перераспределения потоков мощности в сети.

В ряде ремонтных схем выявлена необходимость вывода устройства из работы, что может быть реализовано шунтированием устройства по стороне 220 кВ.

Стоит отметить, что использованный критерий определения места установки устройства для увеличения допустимых перетоков в сечении не является единственным. Для оптимального выбора места установки и настроек устройства необходимо оценить влияние режимов работы устройства на величину потерь в сети, статическую и динамическую устойчивость, возможность регулирования перетоков по смежным сечениям.

Литература

1. Асташев М.Г., Панфилов Д.И. Фазоповоротные устройства с тиристорными коммутаторами для активно-адаптивных электрических сетей // *Электричество*. 2013. № 8. С. 60—65.
2. Федорова М.И. Повышение управляемости фазоповоротных устройств с тиристорными коммутаторами: дис. ... канд. техн. наук. М.: НИУ «МЭИ», 2016.
3. Евдокунин Г., Николаев Р., Искаков А., Оспанов Б., Утегулов Н. Фазоповоротный трансформатор впервые в СНГ применен в Казахстане // *Новости электротехники*. 2007. № 6 (48). С. 12—16.
4. Johansson N. Control of Dynamically Assisted Phase-shifting Transformers. Stockholm: KTH, 2008.
5. Krämer A., Ruff J. Transformer for Phase Angle Regulation Considering the Selection of On-load Tap-changers // *IEEE Trans. Power Delivery*. 1998. V. 13. No. 2. Pp. 518—525.
6. Verboomen J., Van Hertem D., Schavemaker P.H., Kling W.L., Belmans R. Phase Shifting Transformers: Principles and Applications // *IEEE Future Power Systems Conf. Amsterdam*, 2005. P. 6.

References

1. Astashev M.G., Panfilov D.I. Fazopovortnyye Ustroystva s Tiristornymi Kommutatorami dlya Aktivno-adaptivnykh Elektricheskikh Setey. *Elektrichestvo*. 2013; 8:60—65. (in Russian).
2. Fedorova M.I. Povyshenie Upravlyaemosti Fazopovortnykh Ustroystv s Tiristornymi Kommutatorami: Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. M.: NIU «MEI», 2016. (in Russian).
3. Evdokunin G., Nikolaev R., Iskakov A., Ospantov B., Utegulov N. Fazopovortnyy Transformator Vper-vye v SNG Primenen v Kazakhstane. *Novosti Elektro-tehniki*. 2007;6 (48):12—16. (in Russian).
4. Johansson N. Control of Dynamically Assisted Phase-shifting Transformers. Stockholm: KTH, 2008.
5. Krämer A., Ruff J. Transformer for Phase Angle Regulation Considering the Selection of On-load Tap-changers. *IEEE Trans. Power Delivery*. 1998;13;2: 518—525.
6. Verboomen J., Van Hertem D., Schavemaker P.H., Kling W.L., Belmans R. Phase Shifting Transformers: Principles and Applications. *IEEE Future Power Systems Conf. Amsterdam*, 2005:6.

7. АО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского» (АО «ЭНИН») [Официальный сайт] <http://enin.su/> (дата обращения 16.07.2009).

8. Методические указания по устойчивости энергосистем [Электронный ресурс] https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/laws/regulations/Method_uk_ust.pdf (дата обращения 14.07.2009).

7. АО «Energeticheskiy Institut im. G.M. Krzhizhanovskogo» (АО «ENIN») [Официальный сайт] <http://enin.su/> (Data Obrashcheniya 16.07.2009). (in Russian).

8. Metodicheskie ukazaniya po Ustoychivosti Energosistem [Elektron. Resurs] https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/laws/regulations/Method_uk_ust.pdf (Data Obrashcheniya 14.07.2009). (in Russian).

Сведения об авторе:

Воденников Дмитрий Александрович — заместитель Председателя Правления, главный инженер ПАО «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы», e-mail: zhilkina-yv@fsk-ees.ru

Information about author:

Vodennikov Dmitriy A. — Deputy Chairman of the Management Board, Chief Engineer of PJSC «Federal Grid Company of Unified Energy System», e-mail: zhilkina-yv@fsk-ees.ru

Статья поступила в редакцию: 28.02.2019

The article received to the editor: 28.02.2019