

ISSN 0013-5380

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

2014

7

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**УЧРЕДИТЕЛИ: РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК (Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления),
РОССИЙСКОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО ЭНЕРГЕТИКОВ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКОВ**

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Баке Е., Спитанс С. Научно-исследовательская деятельность Института электротехники Университета им. Лейбница в Ганновере в области электрометаллургических процессов плавления	Baake, E., Spitan, S., Research Activities at the Institute of Electrotechnology in the Field of Metallurgical Melting Processes	4	4
Коротеев А.А., Нагель Ю.А., Сафронов А.А. Решение краевой задачи уравнения Пуассона для движущейся заряженной капельной пленки в форме прямоугольного параллелепипеда	A.A. Koroteyev, Yu.A. Nagel' and A.A. Safonov, Solving the Poisson's Equation Boundary Problem for a Moving Charged Droplet Sheet Having the Shape of a Rectangular Parallelepiped	11	11
Шакарян Ю.Г., Фокин В.К., Лихачев А.П. Установившиеся режимы электроэнергетических систем с фазоповоротными устройствами (Ч. 1)	Yu.G. Shakaryan, V.K. Fokin and A.P. Likhachev, Steady-State Operating Conditions of Electric Power Systems Containing Phase Shifting Devices.	16	16
Салимова А.С., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. Метод анализа высших гармоник напряжения в магистральной электрической сети.	A.S. Salimova, V.N. Tul'skii and R.G. Shamonov, A Method for Analyzing Higher Harmonic Components of Voltage in a Bulk Power System	26	26
Сивокобыленко В.Ф. Математическая модель многомашинной электрической системы в фазных координатах	V.F. Sivokobylenko, The Mathematical Model of a Multimachine Electric System in the Phase Coordinate Axes.	34	34
Елистратов В.В. Работа ветроэлектростанций в энергосистеме и «мифы» об их негативном влиянии.	V.V. Elistratov, Operation of Wind Power Plants in a Power System and «Myths» about Their Negative Effects	41	41
Белов Г.А., Абрамов С.В. Анализ устойчивости и показателей качества переходных процессов в одноконтурной системе управления понижающим импульсным преобразователем.	G.A. Belov and S.V. Abramov, Analyzing the Stability and Indicators Characterizing the Quality of Transients in the Single-Loop System for Control of a Step-Down Impulse Converter	49	49
Агамалов О.Н. Физические процессы при демпфировании электромеханических колебаний синхронной машины с модульно-фазовым автоматическим регулятором возбуждения	O.N. Agamalov, Physical Processes in Damping Electromechanical Swings of a Synchronous Machine Equipped with a Modulus-Phase Automatic Excitation Controller	58	58
ХРОНИКА		CHRONICLE	
Памяти Александра Степановича Шаталова (К 100-летию со дня рождения)	In memory Aleksandr Stepanovich Shatalov (to Mark the 100th Anniversary)	67	67
Памяти Александра Васильевича Баева (К 100-летию со дня рождения)	In memory Aleksandr Vasil'yevich Bayev (to Mark the 100th Anniversary)	68	68

REFERENCES

1. Gogosov V.V., Nikiforovich E.I., Tolmachev V.V. *Magnitnaya gidradinamika (Magnetic Hydrodynamics)*, 1979, № 2, pp. 59–62.
2. Pribylov V.N., Chernyi L.T. *Mekhanika zhidkosti i gaza (Liquid and Gas Mechanics)*, 1979, № 6, pp. 41–47.
3. Pribylov V.N., Makarov V.N. *Vestnik Moskovskogo Universiteta (Bulletin of the Moscow State University)*, 1998, № 4, pp. 50–54.
4. Zhakin A.I. *Prikladnaya mekhanika i tekhnika fiziki (Applied Mechanics and Technique of Physics)*, 1982, № 5, pp. 31–37.
5. Kaminskii M. *Atomnye i ionnye stolknoveniya na poverkhnosti metalla (Atom and Ion Collisions on the Metal Surface)*. Moscow. Publ. «Mir», 1967, 508 p.
6. *Elektrizatsiya zhidkosti i eye prodotvrashchenie (Electrization of Fluids and Measures to Prevent It)*. Moscow. Publ. «Khimiya», 1975, 127 p.
7. Nikiforovich E.I., Tolmachev V.V., Shaposhnikova G.A. *Mekhanika zhidkosti i gaza (Liquid and Gas Mechanic)*, 1983, № 1, pp.75–80.
8. GOST 25645. 138–86. *Poyasa Zemli radiatsionnye estestvennye. Model' prostranstvenno-energeticheskogo raspredeleniya plotnosti potoka protonov (Natural Radiation Belts of the Earth. The Model of Spatial-Energy Distribution of Proton Flux Density)*. Moscow. Izd. Standartov, 1986.
9. GOST 25645. 139–86. *Poyasa Zemli radiatsionnye estestvennye. Model' prostranstvenno-energeticheskogo raspredeleniya plotnosti elektronov (Natural Radiation Belts of the Earth. The Model of Spatial-Energy Distribution of Electron Flux Density)*. Moscow. Izdat. Standartov, 1986.
10. GOST 25645. 155–91. *Izlučenje v geomagnitnom pole. Model' potokov protonov i elektronov nizkikh energii (Radiation in the Geomagnetic Field. The Model of Low-Energy Proton and Electron Fluxes)*. Moscow. Izd. Standartov, 1991.
11. *Radiatsionnaya stoikost' organicheskikh materialov (Spravochnik)/Pod red. V.K. Milinchuka, V.I. Tupikova (Radiation Stability of Organic Materials)*. Moscow. Energoatomizdat, 1986, 272 p.
12. Vlasov A.A. *Teoriya mnogikh chastits (Theory of Many Particles)*. Moscow. Publ. Book's House «LIBROKOM», 2012, 352 p.
13. Grinberg G.A. *Izbrannye voprosy matematicheskoi teorii elektricheskikh i magnitnykh yavlenii (Selected Issues of the Mathematical Theory of Electric and Magnetic Phenomena)*. Moscow, Leningrad. Izd. Ross. Akad. Nauk, 1948, 727 p.

Author: Koroteyev Anatolyii Anatolyevich in 1983 graduated from the Moscow Aviation Institute (MAI). In 2000 he received the degree of Doctor Techn. Sci. in MAI. He is Academician of RAS and Director of the Centre «New technologies» MAI.

Nagel' Yurii Anatolyevich in 1961 he graduated from the Moscow Physics-Technical Institute. In 1993 he received the degree of Doctor Techn. Sci. in «M.V. Keldysh Research Center». He is a Chief Scientific Researcher in «Keldysh research Center».

Safronov Andrei Aleksandrovich – Student of the Moscow Physics Technical Institute.

* * *

Установившиеся режимы электроэнергетических систем с фазоповоротными устройствами (Часть 1)

ШАКАРЯН Ю.Г., ФОКИН В.К., ЛИХАЧЕВ А.П.

На примере электроэнергетической системы простой структуры, содержащей одну и две параллельно работающие линии электропередачи, представлены ее аналитические зависимости и режимные характеристики в установившемся режиме при наличии на передающем конце электропередачи различного типа фазоповоротных устройств (ФПУ), построенных на основе фазоповоротного трансформатора и на основе современной силовой электроники – объединенного регулятора потока мощности. Рассмотрены ограничения применения отдельных типов ФПУ и мероприятия по их ослаблению. Выполнен анализ распределения потоков активной и реактивной мощностей внутри данных типов устройств с рассмотрением значений амплитуды и фазы тока на входе и выходе ФПУ. Получены соотношения, определяющие установленную мощность различных типов ФПУ, и при относительно равном влиянии на энергосистему проведено сопоставление как требуемых установленных мощностей, так и их стоимости. Исследовано перераспределение потоков мощности между параллельно работающими линиями электропередачи при наличии фазоповоротных устройств на одной из них для случаев наличия и отсутствия ограничения токовой нагрузки ЛЭП по нагреву проводов.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, линия электропередачи, фазоповоротное устройство, фазоповоротный трансформатор, объединенный регулятор потока мощности

Статья является продолжением статьи [1], в которой рассматривались установившиеся режимы электроэнергетической системы (ЭЭС) простой структуры с устройствами FACTS поперечного и продольного включения, и посвящена исследованию установившихся режимов и характеристик ЭЭС простой структуры, содержащей одноцепную и двухцепную линию электропередачи (ЛЭП) с фа-

зоповоротными устройствами (ФПУ) различного типа на передающем конце электропередачи (рис. 1).

При использовании в ЭЭС ФПУ решается задача изменения соответствующим образом угла между векторами напряжений источника и приемника для улучшения условий динамической устойчивости, демпфирования электромеханических колеба-

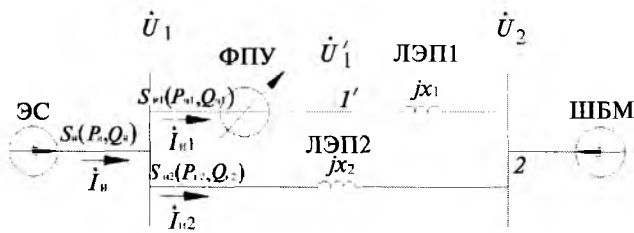


Рис. 1. Схема исследуемой ЭЭС: ЭС – электростанция; ШБМ – шины бесконечной мощности

ний, а при установке ФПУ на одной из параллельно работающих линий электропередачи – для оптимального перераспределения потоков активной мощности в параллельно работающих ЛЭП различного или одинакового класса напряжений для максимального использования пропускной способности данной электропередачи или снижения потерь активной мощности.

Существующее в настоящее время множество разновидностей ФПУ можно разделить по способу формирования вектора вольтодобавочного напряжения (ВДН) $\Delta \dot{U}$ на ортогональный и симметричный (рис. 2). По типу регулирования эти устройства делятся на плавно регулируемые и ступенчато регулируемые.

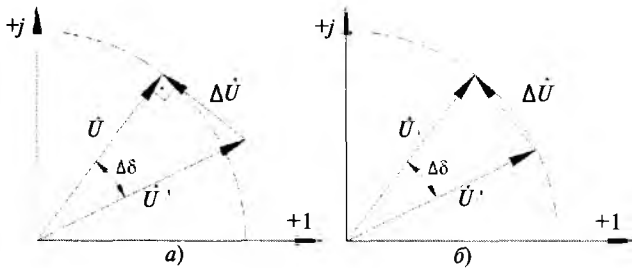


Рис. 2. Способы формирования вольтодобавочного вектора напряжения: а – ортогональный; б – симметричный

В ортогональном ФПУ вектор $\Delta \dot{U}$ направлен перпендикулярно к вектору фазного напряжения \dot{U}_1 на входе устройства (рис. 1). Как следует из рис. 2,а, значение вектора $\Delta \dot{U}$ при заданном (номинальном) векторе \dot{U}_1 должно быть ограничено

по условиям допустимого значения вектора \dot{U}'_1 , что ограничивает значение угла поворота $\Delta \delta$ вектора $\Delta \dot{U}$.

При симметричном ФПУ этого ограничения не существует, так как угловое положение вектора $\Delta \dot{U}$ относительно вектора \dot{U}_1 не является постоянным, а формируется таким образом, чтобы значения векторов \dot{U}_1 и \dot{U}'_1 оставались неизменными (номинальными) при любом значении вектора $\Delta \dot{U}$ (рис. 2,б).

Устройством плавного регулирования вектора $\Delta \dot{U}$ является объединенный регулятор потока мощности (ОРПМ) который построен на основе двух преобразователей напряжения ПН1 и ПН2, включаемых в линию параллельно и последовательно и соединенных на стороне постоянного тока параллельно (рис. 3). Основную функцию ОРПМ выполняет ПН2 путем введения в линию через последовательно включенный трансформатор вектора $\Delta \dot{U}$. Вектор $\Delta \dot{U}$ может изменяться по значению и по фазе независимо от значения вектора тока в линии. В общем случае фаза вектора $\Delta \dot{U}$ по отношению к току линии отличается от 90° , что означает наличие обмена активной мощностью между линией и ПН2. Данная мощность отбирается (или выдается) с шин узла 1 (рис. 3), передается через ПН1 и связь по постоянному току в ПН2 и далее в узел 1'. Ко второй функции ПН1 относится обеспечение поперечной компенсации реактивной мощности с целью стабилизации (или заданного регулирования) значения напряжения \dot{U}_1 и которая в статье не рассматривается, так как при установке ФПУ на передающем конце напряжение \dot{U}_1 регулируется (поддерживается неизменным) генераторами электростанции (рис. 1).

В статье устройство ОРПМ рассматривается в режиме работы ФПУ с симметричным формированием $\Delta \dot{U}$; другие возможности устройства ОРПМ (продольная, поперечная компенсация и др.) описаны в [2–4].

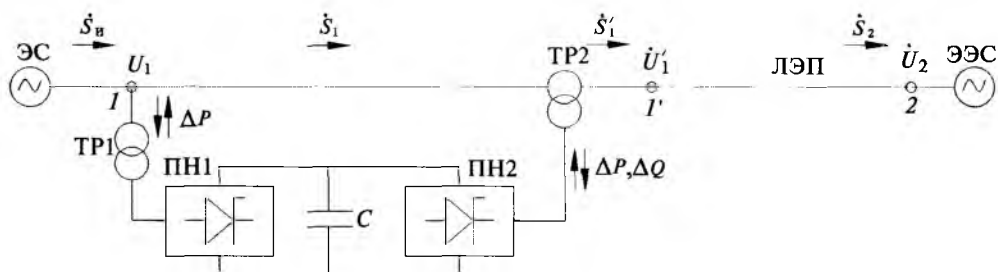


Рис. 3. Исследуемая ЭЭС с устройством ОРПМ в начале электропередачи

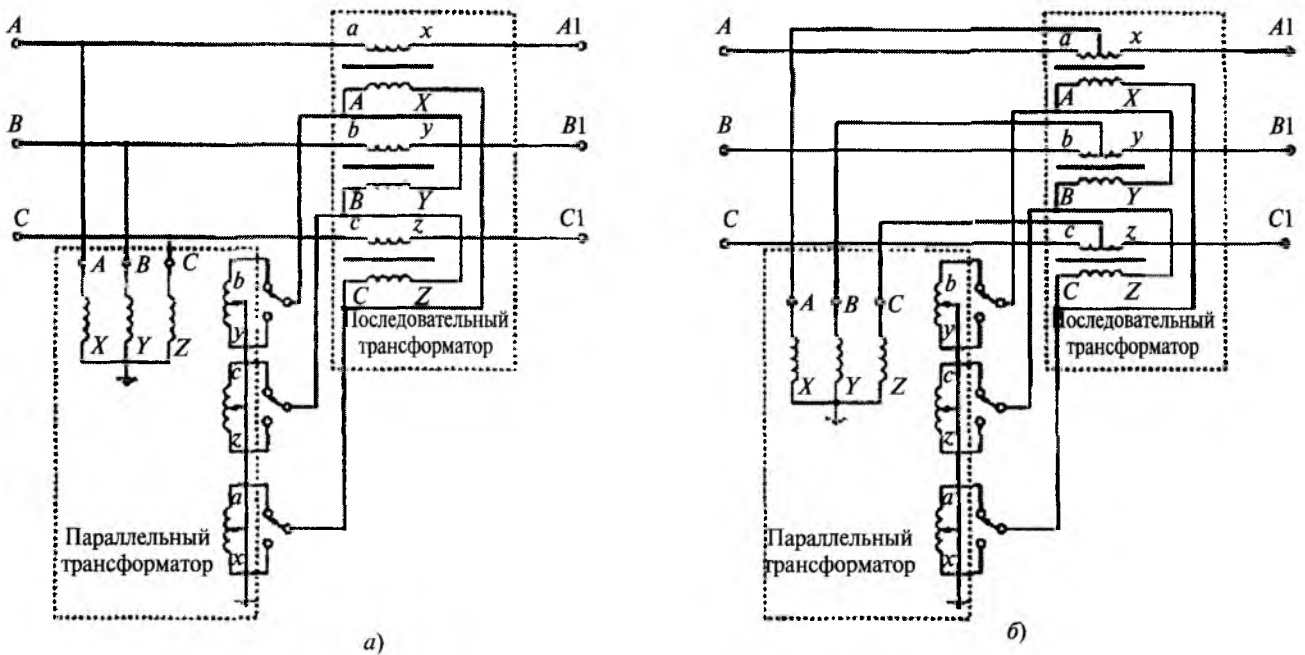


Рис. 4. Рассматриваемые схемы ФПТ: а – ортогональное формирование $\Delta \vec{U}$; б – симметричное формирование $\Delta \vec{U}$

Фазоповоротное устройство трансформаторного типа (ФПТ) является устройством ступенчатого регулирования вектора $\Delta \vec{U}$. Существует множество технических решений ФПТ [5], среди которых наибольшее распространение получила схема, основанная на двух трансформаторах параллельного и последовательного включения.

На рис. 4,а изображена схема ФПТ с ортогональным формированием вектора $\Delta \vec{U}$. Здесь переключение отпаяк на параллельном трансформаторе может осуществляться как выключателями, так и тиристорными коммутаторами.

Более сложной схемой ФПТ является устройство, обеспечивающее симметричное формирование вектора $\Delta \vec{U}$ (рис. 4,б), что достигается применением РПН в обмотках как параллельного, так и последовательного трансформатора. Данное усложнение оправдано тем, что практически не ограничивается диапазон регулирования угла $\Delta \delta$ вектора ВДН. Следует отметить, что подобная схема ФПТ с тиристорными коммутаторами разрабатывается в России специалистами ОАО «ЭНИН им. Г.М. Кржижановского» [6].

Несмотря на довольно большое число публикаций и работ по ФПУ, свойства и характеристики этих устройств в установившихся режимах, анализ потоков активной и реактивной мощностей в них, сопоставление установленных мощностей различных типов ФПУ отражены в литературе, по мнению авторов, недостаточно [7–11]. Исследованию данных вопросов посвящена настоящая статья.

Исходные допущения, эквивалентные схемы исследований. Не нарушая общности результатов исследования, были приняты следующие допущения: не учитываются потери в устройствах ФПУ и потери активной мощности и зарядная мощность ЛЭП.

На рис. 5 приведены эквивалентные схемы исследования потоков мощности в ОРПМ и ФПТ.

На векторных диаграммах напряжений (рис. 2) показано, что изменение углового положения вектора \vec{U}_1 относительно вектора \vec{U}'_1 осуществляется за счёт изменяемого по модулю и фазе вектора ВДН $\Delta \vec{U} = \vec{U}_1 - \vec{U}'_1$. Благодаря этому возникает дополнительная мощность $\Delta S_1(\Delta P_1, \Delta Q_1)$, обусловленная взаимодействием вектора тока в линии $\vec{I}_л$ и вектора $\Delta \vec{U}$.

При этом принципиальная разница в работе устройств ОРПМ и ФПТ заключается в том, что в первом случае мощность ΔQ_1 генерируется или потребляется преобразователем ПН2 (рис. 3), а через ПН1 протекает только активная мощность ΔP_1 , обусловленная неортогональностью векторов $\Delta \vec{U}$ и тока в линии.

В случае же ФПТ, в составе которого отсутствует источник реактивной мощности, мощности ΔP_1 и ΔQ_1 транзитом проходят через параллельно включенный трансформатор (рис. 4).

Фундаментальным же условием функционирования как ОРПМ, так и ФПТ является условие равенства активных мощностей на входе и выходе устройства: $P_{и} = P'_1 = P_2$.

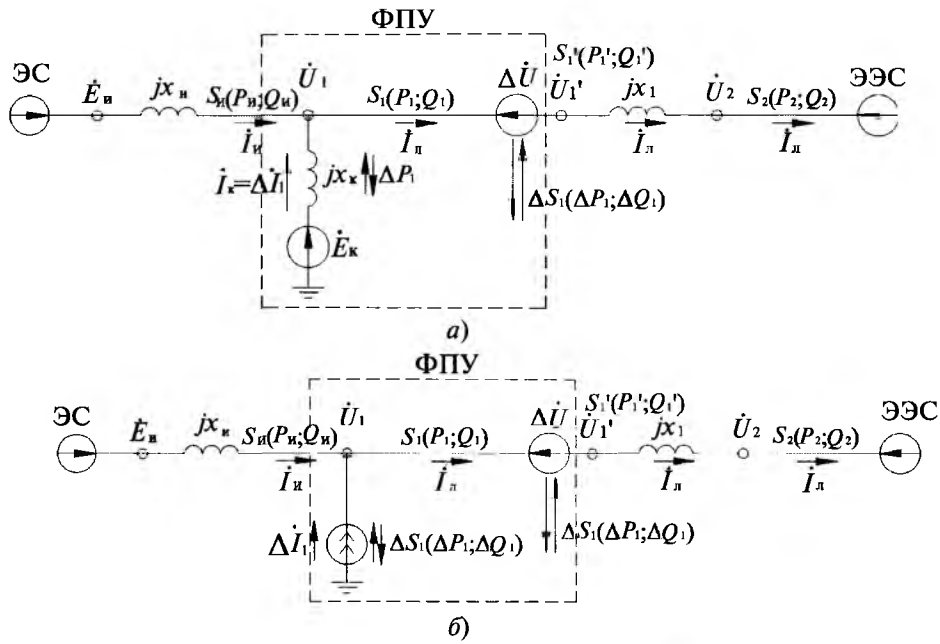


Рис. 5. Эквивалентная схема исследования процессов в ЭЭС с: ОРПМ (а) и ФПТ (б): \dot{E}_n и x_n — ЭДС и реактивное сопротивление источника (генератора электрической станции); S_n, P_n, Q_n — полная, активная и реактивная мощности источника соответственно; S_1, P_1, Q_1 — внутренние потоки мощности в исследуемых ФПУ; S'_1, P'_1, Q'_1 — мощности в начале линии электропередачи; S_2, P_2, Q_2 — мощности в конце ВЛ и у шин приемной энергосистемы

Отметим еще раз, что это условие справедливо при неучете активных потерь в ФПУ и ЛЭП.

Свойства одноцепной электропередачи с различными типами ФПУ. 1. ФПУ с симметричным формированием вектора $\Delta\dot{U}$. Рассматривается одноцепная электропередача (рис. 1, $x_2 = \infty$). Конкретные расчеты выполнены для параметров электропередачи согласно [1]: $x_1 = x_{л} = 200$ Ом (0,8 отн.ед.) при $U_{баз} = 500$ кВ, $S_{баз} = 1000$ МВА, $z_{баз} = 250$ Ом. Узел 2 принимается в качестве базисного и балансирующего ($U_2 = U_{ном} = 1, \delta_2 = 0$) и напряжение на шинах электростанции U_1 поддерживается номинальным $U_1 = U_{ном} = 1$ за счет АРВ генераторов.

Независимо от типа ФПУ при симметричном формировании вектора ВДН $\Delta\dot{U}$ и принятых условиях векторная диаграмма токов и напряжений показана на рис. 6. При этом взаимосвязь модулей и фаз векторов напряжений в рассматриваемой электропередаче соответствует:

$$\dot{U}_1 = U_1 e^{j\delta_1}; \dot{U}_2 = U_2 e^{j\delta_2}; \dot{U}'_1 = U'_1 e^{j\delta'_1};$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}'_1 + \Delta\dot{U}; \delta'_1 = \delta_1 + \Delta\delta.$$

Примем $|\dot{U}_1| = |\dot{U}_2| = U_{ном} = U.$

Активная мощность, передаваемая по ЛЭП равна

$$P_n = \frac{U_1 U_2}{x} \sin \delta'_1 = \frac{U^2}{x} \sin \delta'_1.$$

При заданной активной мощности в случае отсутствия ФПУ имеет место $\delta_1 = \delta'_1$, а при наличии

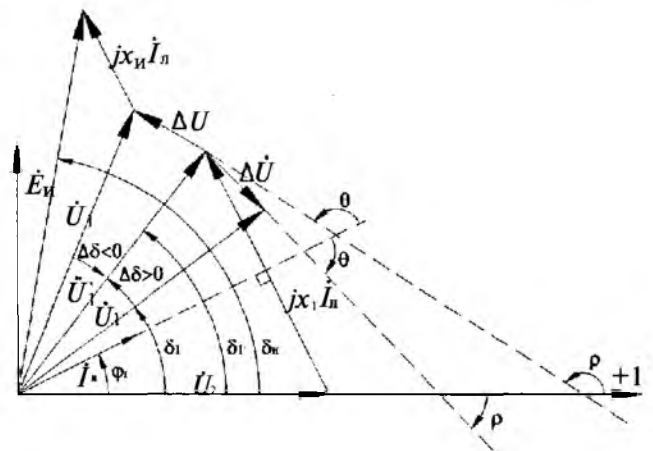


Рис. 6. Векторная диаграмма токов и напряжений электропередачи с ФПУ

ФПУ угол δ'_1 остается неизменным, но изменяется значение $\delta_1 = \delta'_1 - \Delta\delta$. Здесь $\Delta\delta$ — угол поворота фазы вектора U_1 относительно вектора U'_1 , как это представлено на векторной диаграмме рис. 6. Данное изменение, в свою очередь, повлияет на изменение фазы вектора источника ЭДС δ_n (относительно U_2) при сохранении неизменного значения мощности источника согласно выражению:

$$P_n = \frac{E_n U}{x_n} \sin(\delta_n - \delta_1) = \frac{U^2}{x} \sin \delta'_1 = P'_1.$$

Аналитические выражения для тока $I_{л}$, фазы φ_1 и мощностей S'_1, P'_1, Q'_1 в рассматриваемой электрической схеме будут иметь вид:

$$I_{\text{Л}} = \frac{\dot{U}'_1 - \dot{U}'_2}{jx_{\text{Л}}} = I_{\text{Л}} e^{j\varphi_1};$$

$$I_{\text{Л}} = \frac{U}{x_{\text{Л}}} \sqrt{2(1 - \cos \delta'_1)} = \frac{2U}{x_{\text{Л}}} \sin \left| \frac{\delta'_1}{2} \right| = \frac{2U}{x_{\text{Л}}} \sin \left| \frac{\delta_1 - \Delta\delta}{2} \right|;$$

$$I_{\text{Л}} = \frac{2U}{x_{\text{Л}}} \sin \left(\frac{\delta_1 + \Delta\delta}{2} \right) \text{ при } \delta'_1 = \delta_1 + \Delta\delta > 0;$$

$$\varphi_1 = \arctg \left(\frac{1 - \cos \delta'_1}{\sin \delta'_1} \right) = \frac{\delta'_1}{2} = \frac{\delta_1 + \Delta\delta}{2};$$

$$\dot{S}'_1 = \dot{U}'_1 \hat{I}_{\text{Л}} = U'_1 I_{\text{Л}} e^{j(\delta'_1 - \varphi_1)} = \frac{2U^2}{x_{\text{Л}}} \sin \left(\frac{\delta_1 + \Delta\delta}{2} \right) e^{j \left(\frac{\delta_1 + \Delta\delta}{2} \right)};$$

$$P'_1 = \text{Re}(\dot{S}'_1) = \frac{2U^2}{x_{\text{Л}}} \sin \left(\frac{\delta_1 + \Delta\delta}{2} \right) \cos \left(\frac{\delta_1 + \Delta\delta}{2} \right) = \frac{U^2}{x_{\text{Л}}} \sin(\delta_1 + \Delta\delta);$$

$$Q'_1 = \text{Im}(\dot{S}'_1) = \frac{2U^2}{x_{\text{Л}}} \sin \left(\frac{\delta_1 + \Delta\delta}{2} \right) \sin \left(\frac{\delta_1 + \Delta\delta}{2} \right) = \frac{U^2}{x_{\text{Л}}} (1 - \cos(\delta_1 + \Delta\delta)).$$

(1)

На рис. 7 представлены угловые характеристики электропередачи при значении ФПУ $\Delta\delta = \pm 30^\circ$ и приведены значения углов при передаче активной мощности по ЛЭП $P_{\text{и}} = 1$ отн. ед. (точки A_1, A_2, A_3).

Следовательно, с помощью ФПУ в одноцепной электропередаче можно изменять фазу δ_1 вектора \dot{U}'_1 так, что при ее увеличении угловая характеристика электропередачи смещается по горизонтали вправо (что соответствует отрицательному значению

P'_1 , отн. ед.

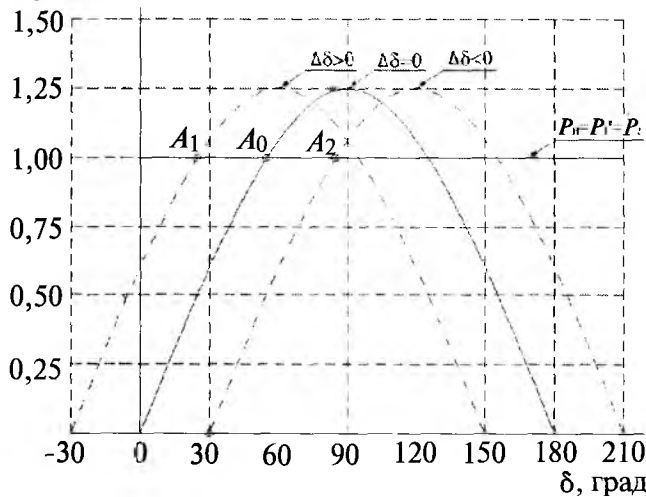


Рис. 7. Угловые характеристики электропередачи с ФПУ при значении $\Delta\delta = \pm 30^\circ$

нию $\Delta\delta = -30^\circ < 0$), а при ее уменьшении она смещается влево ($\Delta\delta = 30^\circ > 0$).

Эту возможность можно использовать в динамических режимах как для повышения динамической устойчивости ЭЭС, так и для демпфирования электромеханических колебаний. Конкретный анализ этих явлений является предметом отдельного исследования.

2. Объединенный регулятор потока мощности в режиме ФПУ. Согласно схеме рис. 6,а можно записать следующие выражения для внутреннего потока мощности S_1, P_1, Q_1 :

$$\dot{S}_1 = \dot{U}'_1 \hat{I}_{\text{Л}} = U'_1 I_{\text{Л}} e^{j(\delta_1 - \varphi_1)} = \frac{2U^2}{x_{\text{Л}}} \sin \left(\frac{\delta_1 + \Delta\delta}{2} \right) e^{j \left(\frac{\delta_1 - \Delta\delta}{2} \right)}$$

$$P_1 = \text{Re}(\dot{S}_1) = \frac{2U^2}{x_{\text{Л}}} \sin \left(\frac{\delta_1 - \Delta\delta}{2} \right) \cos \left(\frac{\delta_1 - \Delta\delta}{2} \right) = \frac{U^2}{x_{\text{Л}}} (\sin \delta_1 + \sin \Delta\delta);$$

$$Q_1 = \text{Im}(\dot{S}_1) = \frac{2U^2}{x_{\text{Л}}} \sin \left(\frac{\delta_1 - \Delta\delta}{2} \right) \sin \left(\frac{\delta_1 - \Delta\delta}{2} \right) = \frac{U^2}{x_{\text{Л}}} (-\cos(\delta_1 + \cos \Delta\delta)).$$

(2)

Определим значения активной мощности, отбираемой в контур ПН1—ПН2, и реактивной мощности, генерируемой (или потребляемой) последовательно включенным преобразователем ПН2, согласно рис. 6. Полная мощность равна соответственно:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{S}_1 &= \Delta \dot{U}'_1 \hat{I}_{\text{Л}} = \Delta U I_{\text{Л}} e^{j\theta} = \Delta U I_{\text{Л}} e^{j(\rho - \varphi_1)} = \\ &= \frac{2\Delta U U}{x_{\text{Л}}} \sin \left(\frac{\delta_1 + \Delta\delta}{2} \right) e^{j \left(\rho - \frac{\delta_1 + \Delta\delta}{2} \right)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Значение вектора $\Delta \dot{U}$ и его фазу ρ можно получить, используя зависимости

$$\dot{U}'_1 = \dot{U}'_1 + \Delta \dot{U} \text{ и } \delta'_1 = \delta_1 + \Delta\delta:$$

$$\Delta U = 2U \sin \left| \frac{\Delta\delta}{2} \right|; \quad (4)$$

$$\rho = \mp 90^\circ + \delta_1 + \frac{\Delta\delta}{2}, \quad (5)$$

где «-» соответствует $\Delta\delta > 0$, а «+» соответствует $\Delta\delta < 0$.

Подставляя (4) и (5) в (3), получим:

$$\Delta \dot{S}_1 = \frac{4U^2}{x_{л}} \sin \left| \frac{\Delta \delta}{2} \right| \sin \left(\frac{\delta_1 + \Delta \delta}{2} \right) e^{j \left(\frac{\delta_1 + \Delta \delta}{2} \mp 90^\circ \right)}$$

$$\Delta P_1 = \operatorname{Re}(\Delta \dot{S}_1) = \frac{4U^2}{x_{л}} \sin \left| \frac{\Delta \delta}{2} \right| \sin \left(\frac{\delta_1 + \Delta \delta}{2} \right) \cos \left(\frac{\delta_1 + \Delta \delta}{2} \mp 90^\circ \right) =$$

$$= \frac{U^2}{x_{л}} [\sin \delta_1 + \sin \Delta \delta - \sin(\delta_1 + \Delta \delta)] = P_1 - P_1';$$

$$\Delta Q_1 = \operatorname{Im}(\Delta \dot{S}_1) = \frac{4U^2}{x_{л}} \sin \left| \frac{\Delta \delta}{2} \right| \sin \left(\frac{\delta_1 + \Delta \delta}{2} \right) \sin \left(\frac{\delta_1 + \Delta \delta}{2} \mp 90^\circ \right) =$$

$$= \frac{U^2}{x_{л}} [-\cos \delta_1 + \cos \Delta \delta - 1 + \cos(\delta_1 + \Delta \delta)] = Q_1 - Q_1'.$$

(6)

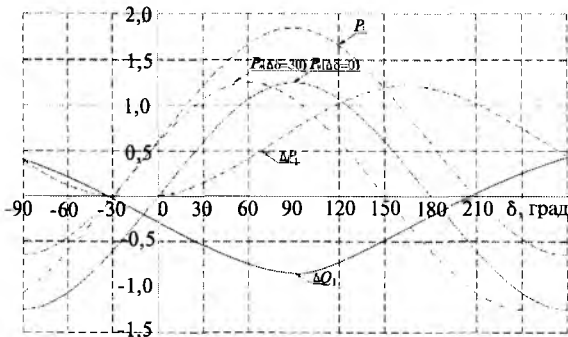
Из (1), (2) и (6) следует:

$$P_{и} = P_1 - \Delta P_1 = \frac{U^2}{x_{л}} \sin(\delta_1 + \Delta \delta) = P_1';$$

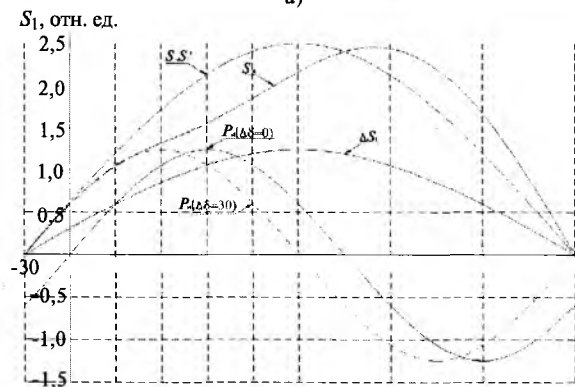
$$Q_{и} = Q_1 = Q_1' - \Delta Q_1 = \frac{U^2}{x_{л}} (-\cos \delta_1 + \cos \Delta \delta),$$

что подтверждает основное свойство ОРПМ в режиме ФПУ: активные мощности на входе и выходе устройства равны друг другу, а реактивные мощности различаются благодаря использованию ПН2 в качестве источника реактивной мощности.

Сравнивая (1) и (2), легко установить, что модули S_1' и S_1 равны друг другу, при этом по отдельности P_1' , отн. ед.



а)



б)

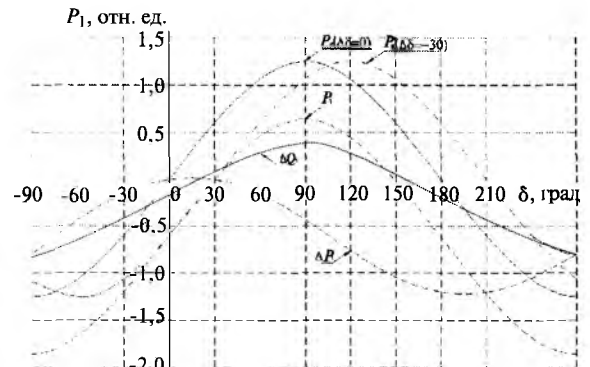
сти активная и реактивная составляющие этих мощностей не равны между собой ($P_1' \neq P_1$, $Q_1' \neq Q_1$). Тогда можно записать следующие соотношения между полными мощностями в электропередаче с ОРПМ в режиме ФПУ:

$$S_{и} \neq S_1' = S_1; \dot{S}_{и} \neq \dot{S}_1' \neq \dot{S}_1. \quad (6a)$$

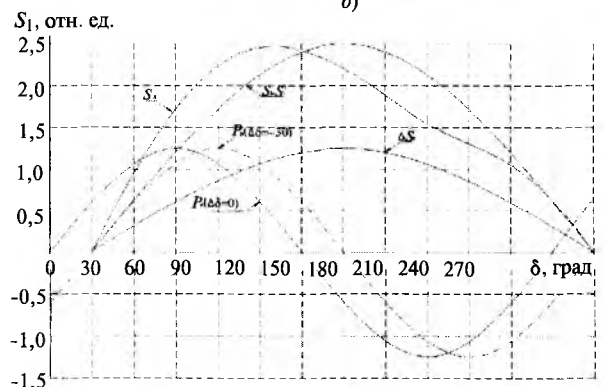
В качестве иллюстрации на рис. 8, а, б представлены зависимости активных и реактивных мощностей внутри устройства в функции угла электропередачи $\delta_1 = \delta$, а на рис. 8, в, г зависимости полных мощностей внутри ОРПМ при изменении $\Delta \delta$ на $\pm 30^\circ$.

При анализе рис. 8, а, б можно отметить, что при $\Delta \delta = 30^\circ$ значение активной мощности ΔP_1 внутри устройства превышает активную мощность на входе и выходе устройства за счет возникновения в устройстве циркулирующего потока активной мощности в замкнутом контуре (в данном случае по часовой стрелке, т.е. отбирается с шин узла 1' и выдается в узле 1 посредством ПН1-ПН2 в сумме с основным потоком $P_{и} = P_1'$). При этом активная мощность P_1 не превышает полную мощность S_1 , но лишь изменяется соотношение между P_1 и Q_1 согласно $S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}$ при различных значениях угла $\Delta \delta$.

Зависимости $S_{и}$ и $S_1 = S_1'$ в функции угла δ (рис. 8, в, г) свидетельствуют о том, что при $\Delta \delta$, от-



в)



г)

Рис. 8. Зависимости изменения активных и реактивных (а и б) и полных (в и г) мощностей внутри устройства ОРПМ в режиме ФПУ от передаваемой мощности: а, в — $\Delta \delta = 30^\circ$; б, г — $\Delta \delta = -30^\circ$

лично от нуля, имеем $S_{и} \neq S_1 = S_1'$, причем при определенных значениях угла $\Delta\delta$ получаем $S_{и} > S_1 = S_1'$, а при других $S_{и} < S_1 = S_1'$.

Для определения направлений и значений потоков мощности $\Delta P_1(\Delta\delta)$ и $\Delta Q_1(\Delta\delta)$ удобно использовать угол $\theta = \rho - \varphi_I = \frac{\delta_1}{2} \mp 90^\circ = \frac{\delta_1 + \Delta\delta}{2} \mp 90^\circ$ (рис. 6) между векторами тока в линии и ВДН и следующие выражения:

$$\Delta P_1 = \Delta UI_{л} \cos(\theta); \quad \Delta Q_1 = \Delta UI_{л} \sin(\theta).$$

Тогда, к примеру, $\Delta P_1 \geq 0$ имеет место при $-90 < \theta < 90$ или $0 < \Delta\delta < 90$ для $\delta_1' = 90^\circ$, или $\Delta P_1 < 0$ справедливо при $90 < \theta < -90$ или $90 < \Delta\delta < 0$ для $\delta_1' = 90^\circ$.

3. Фазоворотный трансформатор с симметричным формированием $\Delta\dot{U}$. Все формулы, приведенные ранее для ОРПМ, сохраняются в этом случае, кроме соотношений для $Q_{и}$ и $S_{и}$:

$$Q_{и} = Q_1 - \Delta Q_1 = \text{Im}(\Delta S_1) = \frac{4U^2}{x_{л}} \sin\left|\frac{\Delta\delta}{2}\right| \sin\left(\frac{\delta_1 + \Delta\delta}{2}\right) \times \sin\left(\frac{\delta_1}{2} \mp 90^\circ\right) = \frac{U^2}{x_{л}} [-\cos\delta_1 + \cos\Delta\delta] - \frac{U^2}{x_{л}} [-\cos\delta_1 + \cos\Delta\delta - 1 + \cos(\delta_1 + \Delta\delta)] = \frac{U^2}{x_{л}} [1 - \cos(\delta_1 + \Delta\delta)] = Q_1'$$

Соотношения полных мощностей в данном случае имеют следующий вид:

$$S_{и} = S_1' = S_1; \quad S_{и}' = S_1' \neq S_1. \quad (66)$$

Различие модулей полных мощностей до и после устройства ОРПМ или равенство данных величин в устройстве ФПТ с симметричным формированием $\Delta\dot{U}$ требует рассмотрения значений тока до и после рассматриваемых устройств.

Учитывая, что ток в линии после устройства поворота фазы в обоих случаях одинаков, то для устройства ОРПМ согласно (6а) можно записать:

$$\dot{S}_{и} = U_1 I_{и} e^{j(\delta_1 - \varphi_{Iи})} \neq U_1' I_{л} e^{j(\delta_1' - \varphi_{Iл})} = \dot{S}_1';$$

$$I_{и} \neq I_{л}; \quad \Delta\varphi_I = \varphi_{Iл} - \varphi_{Iи} \neq \Delta\delta.$$

А для устройства ФПТ с симметричным формированием вектора $\Delta\dot{U}$ согласно (6б) имеем:

$$\dot{S}_{и} = U_1 I_{и} e^{j(\delta_1 - \varphi_{Iи})} = U_1' I_{л} e^{j(\delta_1' - \varphi_{Iл})} = \dot{S}_1';$$

$$I_{и} = I_{л}; \quad \Delta\varphi_I = \varphi_{Iл} - \varphi_{Iи} = \Delta\delta.$$

Таким образом, важной особенностью рассматриваемого устройства ОРПМ является неодинаковость модулей токов до и после этого устройства. При этом поворот вектора тока $\Delta\varphi_I$ происходит на угол, не равный углу поворота вектора напряжения $\Delta\delta$.

В устройстве ФПТ с симметричным формированием вектора $\Delta\dot{U}$ модули токов до и после уст-

ройства равны и вектор тока поворачивается на угол, равный углу поворота вектора напряжения.

4. Фазоворотный трансформатор с ортогональным формированием вектора $\Delta\dot{U}$. Упрощенная структурная схема ФРТ с ортогональным формированием ΔU_1 , эквивалентная схема замещения рассматриваемой электропередачи с данным устройством представлены на рис. 4,а, 5,б, а на рис. 9 — векторная диаграмма напряжений и токов.

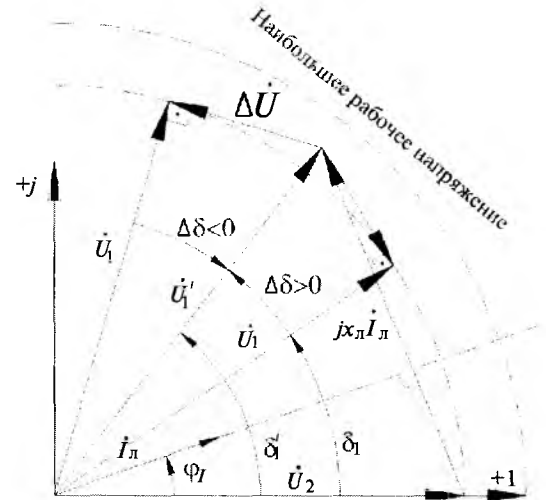


Рис. 9. Векторная диаграмма электропередачи с устройством ФПУ с ортогональным формированием $\Delta\dot{U}$

Учитывая, что условием задачи является $|\dot{U}_1| = |\dot{U}_2| = U_{ном} = U$, то при изменении $\Delta\delta(\Delta U)$ меняется модуль вектора \dot{U}_1' . В этом случае имеем следующие зависимости:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_1' + \Delta\dot{U}; \quad \delta_1' = \delta_1 + \Delta\delta; \quad U_1' = U / \cos\Delta\delta;$$

$$\Delta U = U \text{tg}(|\Delta\delta|); \quad \rho = \mp 90^\circ + \delta_1,$$

где «-» соответствует $\Delta\delta > 0$, а «+» $\Delta\delta < 0$.

Используя полученные зависимости, далее представлены аналитические выражения для угловой характеристики электропередачи, а также потоков мощностей внутри устройства ФРТ в зависимости от передаваемой по электропередаче мощности:

$$\dot{I}_{л} = \frac{\dot{U}_1' - \dot{U}_1}{jx_{л}};$$

$$P_1' = \text{Re}(\dot{U}_1' \hat{I}_{л}) = \frac{U^2}{x_{л}} \sin\delta_1 \pm \frac{U\Delta U}{x_{л}} \cos\delta_1 =$$

$$= \frac{U^2}{x_{л}} (\sin\delta_1 + \cos\delta_1 \text{tg}\Delta\delta);$$

$$Q_1' = \text{Im}(\dot{U}_1' \hat{I}_{л}) = \frac{U^2}{x_{л}} \left(\frac{1}{\cos^2\Delta\delta} - \cos\delta_1 + \sin\delta_1 \text{tg}\Delta\delta \right);$$

$$S_1' = \sqrt{(P_1')^2 + (Q_1')^2};$$

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \text{Re}(\dot{U}_1 \hat{I}_{Л}) = \frac{U^2}{x_{Л}} (\sin \delta_1 + \text{tg} \Delta \delta); \\ Q_1 &= \text{Im}(\dot{U}_1 \hat{I}_{Л}) = \frac{U^2}{x_{Л}} (1 - \cos \delta_1); \\ S_1 &= \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_1 &= \text{Re}(\Delta \dot{U}_1 \hat{I}_{Л}) = \frac{U^2}{x_{Л}} (\text{tg} \Delta \delta - \cos \delta_1 \text{tg} \Delta \delta); \\ \Delta Q_1 &= \text{Re}(\Delta \dot{U}_1 \hat{I}_{Л}) = \frac{U^2}{x_{Л}} (\text{tg}^2 \Delta \delta - \sin \delta_1 \text{tg} \Delta \delta); \\ \Delta S_1 &= \sqrt{\Delta P_1^2 + \Delta Q_1^2}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Из (7)–(9) следует:

$$\begin{aligned} P_{и} &= P_1' = P_1 - \Delta P_1 = \frac{U^2}{x_{Л}} (\sin \delta_1 + \text{tg} \Delta \delta) - \frac{U^2}{x_{Л}} (\text{tg} \Delta \delta - \\ & - \cos \delta_1 \text{tg} \Delta \delta) = \frac{U^2}{x_{Л}} (\sin \delta_1 + \cos \delta_1 \text{tg} \Delta \delta) = P_1'; \\ Q_{и} &= Q_1 - \Delta Q_1 = \frac{U^2}{x_{Л}} (1 - \cos \delta_1) - \frac{U^2}{x_{Л}} (\text{tg}^2 \Delta \delta - \\ & - \sin \delta_1 \text{tg} \Delta \delta) = \frac{U^2}{x_{Л}} \left(\frac{1}{\cos^2 \Delta \delta} - \cos \delta_1 + \sin \delta_1 \text{tg} \Delta \delta \right) = Q_1'. \end{aligned}$$

Анализируя полученные уравнения, можно записать соотношение для полных мощностей в рассматриваемом устройстве:

$$S_{и} = S_1' \neq S_1; \quad \dot{S}_{и} = \dot{S}_1' \neq \dot{S}_1.$$

Далее не составляет труда определить соотношение токов на входе и выходе ФПТ с ортогональным формированием $\Delta \dot{U}$:

$$\dot{S}_{и} = U_1 I_{и} e^{j(\delta_I - \varphi_{Iи})} = \frac{U_1}{\cos \Delta \delta} I_{Л} e^{j(\delta_1' - \varphi_{IЛ})} = \dot{S}_1';$$

$$I_{и} = I_{Л} / \cos \Delta \delta; \quad \Delta \varphi_I = \varphi_{IЛ} - \varphi_{Iи} = \Delta \delta.$$

При анализе полученных зависимостей видно, что модули тока на входе и на выходе устройства пропорциональны изменению модулей напряжений, при этом поворот вектора тока тождественно равен повороту вектора напряжения, что принципиально отличает данное устройство от рассмотренных ранее.

На рис. 10 представлены угловые характеристики электропередачи при наличии ФРТ с возможностью поворота фазы на угол $\Delta \delta = \pm 30^\circ$.

Из анализа построенных характеристик видно, что имеет место смещение не только в горизон-

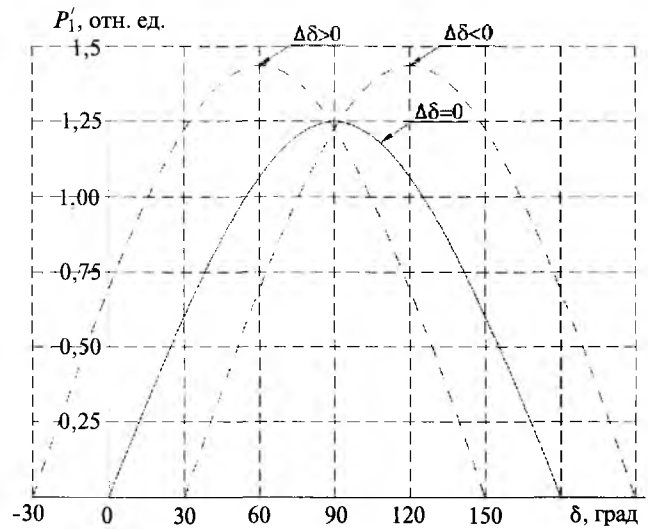


Рис. 10. Угловые характеристики электропередачи с ФПУ с ортогональным формированием вектора ВДН при $\Delta \delta = \pm 30^\circ$

тальной плоскости (как это было с устройствами с симметричным формированием $\Delta \dot{U}$), но и в вертикальной плоскости, что объясняется увеличением значений напряжений на выходном зажиме устройства ФРТ.

На рис. 11 построены зависимости изменения активных мощностей внутри устройства ФРТ от угла передачи для $\Delta \delta = \pm 30^\circ$.

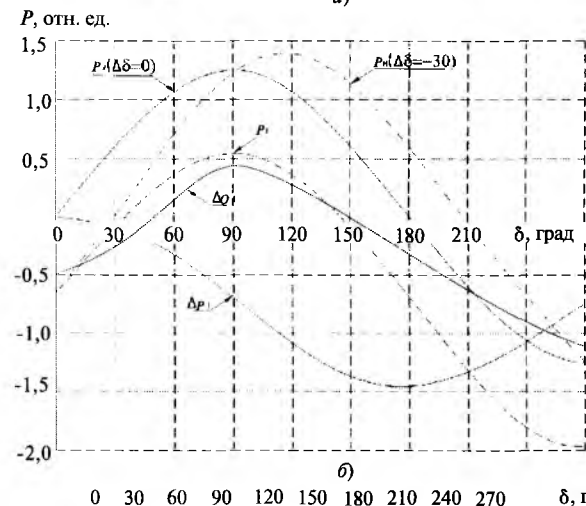
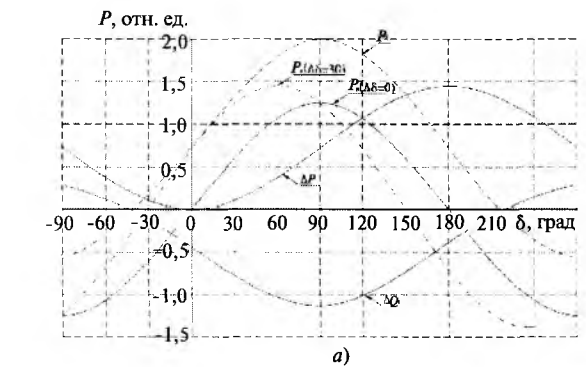


Рис. 11. Зависимости изменения активных и реактивных мощностей внутри устройства ФРТ от передаваемой мощности: а — $\Delta \delta = 30^\circ$; б — $\Delta \delta = -30^\circ$

Как видно из зависимости изменения напряжения от поворота фазы устройства (рис. 12, кривая 1), в случае работы ФПТ с ортогональным формированием вектора $\Delta \dot{U}$ напряжение на выходе устройства может иметь недопустимые значения. К примеру, использование данного устройства в сети СВН без дополнительных мероприятий возможно для рассматриваемой электропередачи лишь с параметрами $\Delta \delta \leq \pm 18^\circ$, при которых $U'_1 \leq 1,05U_{\text{ном}}$.

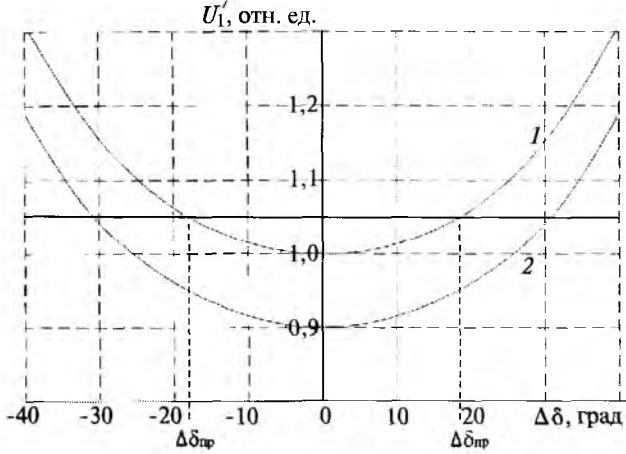


Рис. 12. Зависимость изменения напряжения на выходном зажиме устройства: 1 -- $U_1 = U_{\text{ном}} = U$; 2 -- $U_1 = 0,9U_{\text{ном}} = 0,9U$

Одним из способов увеличения требуемого диапазона регулирования ФПТ с ортогональным формированием вектора $\Delta \dot{U}$ является уменьшение напряжения на входном зажиме устройства U_1 для нормализации напряжения на выходном зажиме U'_1 .

При наличии ФПТ с ортогональным формированием вектора ВДН рассматриваемое мероприятие может быть реализовано установкой в сети дополнительного параллельно включаемого источника реактивной мощности, применением специальной конструкции ФПТ [10] или посредством регулирования возбуждения генераторов электростанции, как это предлагается в статье. Тогда имеет место следующая коррекция аналитической зависимости для построения угловой характеристики электропередачи:

$$\begin{aligned} |\dot{U}_2| &= U_{\text{ном}} = U = 1 \text{ отн. ед.}; \quad U_1 = k_1 U; \\ U'_1 &= \frac{U_1}{\cos \Delta \delta} = \frac{k_1 U}{\cos \Delta \delta}; \\ P'_1 &= \text{Re}(\dot{U}_1 \hat{I}_L) = \frac{k_1 U^2}{x_L} (\sin \delta_1 + \cos \delta_1 \text{tg} \Delta \delta) \end{aligned} \quad (10)$$

где k_1 – коэффициент изменения напряжения U_1 .

На рис. 13 для $k_1 = 0,9$ и соответственно $U_1 = k_1 U = 0,9$ отн. ед. согласно (10) построена угловая характеристика электропередачи с ФПТ.

Из рис. 13 видно, что представленное решение несколько снижает амплитуду смещенной угловой

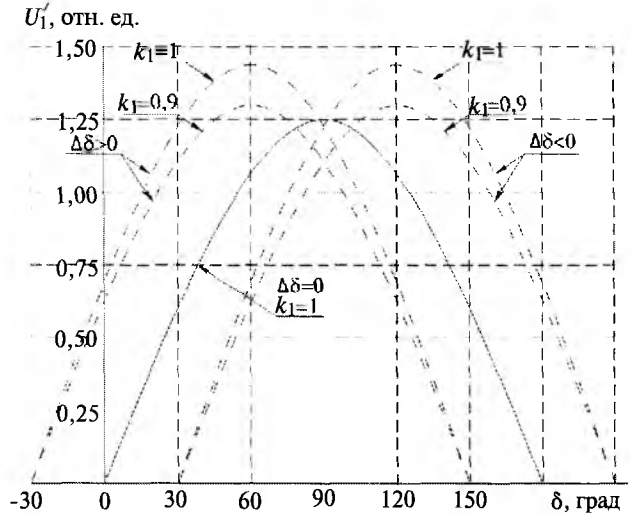


Рис. 13. Угловые характеристики электропередачи с ФРТ с ортогональным формированием $\Delta \dot{U}$ и регулированием U_1

характеристики, но при этом исходный предел передаваемой мощности (при $k_1 = 1$ и $U_1 = 1$) не уменьшается.

Для оценки возможного расширения диапазона регулирования фазы устройства ФРТ с ортогональным формированием $\Delta \dot{U}$ была проведена коррективная соответствующих аналитических выражений для случая фиксации передаваемой по электропередаче мощности:

$$U'_1(\Delta \delta) = \frac{U_1}{\cos \Delta \delta} = \frac{k_1 U}{\cos \Delta \delta}$$

Для $k_1 = 0,9$ построена зависимость изменения напряжения на выходе ФПТ при повороте фазы в широком диапазоне (рис. 12, кривая 2). Анализируя полученные кривые, можно отметить, что уменьшение напряжения на входном зажиме устройства ФПТ до значения $U_1 = k_1 U = 0,9$ позволяет увеличить диапазон поворота фазы с сети СВН от $\pm 18^\circ$ до $\pm 32^\circ$ при выполнении условия $U'_1 \leq 1,05U_{\text{ном}}$, не снижая при этом исходный предел передаваемой мощности.

Продолжение в № 8/2014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шакарян Ю.Г., Фокин В.К., Лихачев А.П. Установившиеся режимы работы электроэнергетических систем с устройствами FACTS. – Электричество, 2013, № 12, с. 2–13.
2. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для вузов. – М.: Издат. дом МЭИ, 2007, 488 с.
3. Hingorani N.G., Gyugyi L. Understanding FACTS. Concept and technology of Flexible AC Transmission Systems. – IEEE press, New York, 2000, 432 pp.
4. Лихачев А.П. Разработка моделей энергосистем с учетом гибких электропередач. – Электричество, 2013, № 2, с. 11–20.
5. Verboomen J., Van Hertem D., Schavemaker P.H., King W.L., Belmans R. Principles and Applications. Future Power Systems. 2005 Intern. Conf. Amsterdam, 2005, 6 p.
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.

7. **Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г.** Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. — М.: Изд-во «ТОРУС ПРЕСС», 2011, 312 с.

8. **Евдокунин Г., Николаев Р., Исакаев А., Оспанов Б., Утегулов Н.** Фазоповоротный трансформатор. Впервые в СНГ применен в Казахстане. — Новости электротехники, 2007, № 6, с. 38—41.

9. **Жмуров В.П., Стельмаков В.Н., Тарасов А.Н.** Применение фазоповоротных устройств с тиристорным управлением как элемента управляемых (гибких) линий электропередачи переменного тока. — Электротехника, 2014, № 1, с. 2—11.

10. **Стельмаков В.Н., Жмуров В.П., Тарасов А.Н.** Фазоповоротные устройства с тиристорным управлением. — Электротехника, 2014, № 1, с. 11—18.

[22.02.14]

Авторы: Шакарян Юрий Гевондович в 1956 г. окончил факультет Ереванского политехнического института. В 1974 г. защитил докторскую диссертацию «Режимы работы асинхронизированных гене-

раторов в энергосистемах» в Энергетическом институте им. Г.М. Кржижановского. Научный руководитель ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».

Фокин Владимир Константинович в 1970 г. окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ — ныне Научно-исследовательский университет МЭИ — НИУ «МЭИ»). В 1980 г. защитил кандидатскую диссертацию «Повышение устойчивости электропередач и узлов нагрузки путем регулирования возбуждения синхронных машин по двум осям». Главный научный сотрудник Центра надежности и режимов работы электрических сетей ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».

Лихачев Андрей Петрович в 2009 г. окончил Институт электроэнергетики НИУ «МЭИ». Ведущий инженер, аспирант Лаборатории моделирования, исследования и применения регулирующих устройств в электрических сетях ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».

Steady-State Operating Conditions of Electric Power Systems Containing Phase Shifting Devices

YU.G. SHAKARYAN, V.K. FOKIN and A.P. LIKHACHEV

The analytic dependences and steady-state operating characteristics of an electric power system fitted with different types of phase-shifting devices (PSDs) installed at the power line sending end (implemented on the basis of a phase-shifting transformer and using a unified power flow controller made on the basis of modern power electronics) are presented taking as an example a simple power system containing one and two parallel power lines. Limitations imposed on the use of individual types of PSDs and measures for relieving them are considered. The distribution of active and reactive power flows inside these types of devices is analyzed taking into consideration the amplitude and phase of the current at the PSD inlet and outlet. Correlations for determining the installed capacity of different types of PSDs are obtained, and comparison of PSDs having relatively commensurable effects on the power system is carried out in terms of the required capacities and costs. The redistribution of power flows between parallel power lines with a PSD installed in one of them is investigated for the cases with and without constraints imposed on the power line current loading based on permissible heating of wires.

Key words: electric power system, power line, phase-shifting device, phase-shifting transformer, unified power flow controller

REFERENCES

1. **Shakaryan Yu.G., Fokin V.K., Likhachev A.P.** *Elektrichestvo (Electricity)*, 2013, № 12, pp. 2—13.
2. **Ryzhov Yu.P.** *Dal'niye elektropredachi sverkhvysokogo napryazheniya (Ultra-high voltage long power transmission lines)*. Moscow. Publ. «House MPEI», 2007, p. 488.
3. **Hingorani N.G., Gyugyi L.** *Understanding FACTS. Concept and technology of Flexible AC Transmission Systems*. — IEEE press, New York, 2000, 432 pp.
4. **Likhachev A.P.** *Elektrichestvo (Electricity)*, 2013, № 2, pp. 11—20.
5. **Verboomen J., Van Hertem D., Schavemaker P.H., King W.L., Belmans R.** *Phase shifting transformer: Principles and Applications. Future Power Systems. 2005 Intern. Conf. Amsterdam, 2005, 6 p.*

6. **Stel'makov V.N., Zhmurov V.P., Tarasov A.N., Grinstein B.I., Tuzlukova E.V.** *Energetik (Power Engineering Specialist)*, 2010, № 8, pp. 20—33.

7. **Kochkin V.I., Shakaryan Yu.G.** *Primeneniye gibkikh (upravlyayemykh) sistem elektropredachi peremennogo toka v energosistemakh (Application of Flexible (Controlled) Electric Power Transmission Systems in Power Systems)*. Moscow. Publ. «TORUS PRESS», 2011, p. 312.

8. **Evdokunin G., Nikolayev R., Iskakov A., Osphanov B., Utegulov N.** *Novosti elektrotehniki (News of electrical engineering)*, 2008, № 6, pp. 38—41.

9. **Zhmurov V.P., Stel'makov V.N., Tarasov A.N.** *Elektrotehnika (Electrical Engineering)*, 2014, № 1, pp. 2—11.

10. **Stel'makov V.N., Zhmurov V.P., Tarasov A.N.** *Elektrotehnika (Electrical Engineering)*, 2014, № 1, pp. 11—18.

Authors: Shakaryan Yuriy Gevondovich graduated from Polytechnic Institute of Yerevan in 1956. In 1974 he received the degree of Doctor Techn. Sci. from Energy Institute G.M. Krzhizhanovskii. He is Scientific Director of JSC «NTC FSC EES».

Fokin Vladimir Konstantinovich graduated from Moscow Power Institute (MPI — now Scientific and Research University — SRU MPI) in 1970. In 1980 he received the degree of Cand. Techn. Sci. He is Chief Scientific Researcher of the JSC «NTC FEC EES».

Likhachev Andrei Petrovich graduated from Electricity Institute of the SRU MPI in 2009. He is Leading Engineer and Ph.D. Student in the JSC «NTC FSC EES».