

Анализ электромагнитных процессов в фазопоротном устройстве с тиристорным управлением

СТЕЛЬМАКОВ В.Н., ТАРАСОВ А.Н.

Одним из эффективных способов повышения устойчивости и надежности электроэнергетических систем (ЭЭС), повышения пропускной способности электрических сетей является создание управляемых (гибких) систем электропередачи переменного тока (FACTS), в том числе применение фазопоротных устройств (ФПУ) с тиристорным управлением. Такие устройства позволяют осуществлять регулирование потоков мощности в темпе электромагнитных и электромеханических процессов в ЭЭС, что обеспечивает быстродействие управления потоками мощности. Быстродействие управляющих устройств является одним из основных требований для межсистемных связей ЭЭС. Выполнен анализ электромагнитных процессов в ФПУ с тиристорным управлением, которое предназначено для непрерывного регулирования перетоков мощности в электрических сетях с параметрической и режимной неоднородностью. Регулирование перетоков мощности осуществляется за счет фазового сдвига выходного напряжения ФПУ высоковольтными тиристорными ключами. Разработана математическая модель ФПУ с тиристорным управлением, включенного в двухмашинную ЭЭС. Анализ электромагнитных процессов в ФПУ выполнен с помощью разработанной математической модели. Получены выражения для вольтодобавочного напряжения и токов, протекающих в серийном и шунтовом трансформаторах при регулировании продольно – поперечным способом. Определен характер и получены значения для мощностей, циркулирующих в схеме ФПУ в установившихся режимах работы системы.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, фазопоротное устройство, тиристорное управление, вольтодобавочное напряжение, фазовый сдвиг, шунтовой трансформатор, серийный трансформатор, переток мощности

Для межсистемных связей в электроэнергетических системах (ЭЭС) одним из основных требований к устройствам FACTS, и в частности к фазопоротным устройствам (ФПУ), является требование высокого быстродействия. В фазосдвигающих трансформаторах с механическим переключением отпаек на переключение только одной ступени затрачивается значительное время: от 2,8 до 5,6 с. Кроме того, по данным докладов на СИГРЭ в трансформаторах с РПН до 40% аварий связано с повреждениями в РПН [1].

С появлением мощных полупроводниковых приборов значительного успеха можно добиться путем замены инерционных механических переключателей быстродействующими тиристорно-управляемыми устройствами [2–8]. ФПУ с тиристорным управлением может обеспечить в темпе процесса сдвиг угловой характеристики мощности, увеличивая площадь торможения синхронного генератора при внезапном нарушении рабочего режима [9]. Это позволяет повысить запас динамической устойчивости генератора, а также уменьшить амплитуду и длительность колебательного процесса. В [4, 5] были представлены аналитические зависимости и режимные характеристики электропередач, включающих ФПУ, построенных на основе

современной силовой электроники – объединенного регулятора потока мощности.

В статье проводится анализ электромагнитных процессов для установившегося режима в тиристорном ФПУ со средней точкой обмотки серийного трансформатора.

В ОАО «ЭНИН» предложено несколько вариантов схем ФПУ с тиристорным управлением. Одна из таких схем показана на рис. 1 [6]. Здесь $T1$ – шунтовой трансформатор, первичные обмотки которого соединены в звезду и питаются от средних точек сетевых обмоток серийного трансформатора $T2$, включенных в рассечку линий соответствующих фаз электропередачи. Вторичная обмотка каждой фазы шунтового трансформатора $T1$ выполняется в виде N гальванически развязанных секций, имеющих разные коэффициенты трансформации и, следовательно, разное число витков $W1:W2:W3...WN$, где N – порядковый номер секции ($N=1,2,3,...,N$). Указанное соотношение числа витков вторичной обмотки трансформатора $T1$ обеспечивает дискретно-непрерывное изменение угла фазового сдвига за счет изменения вольтодобавочного напряжения ФПУ. Минимальный фазовый сдвиг определяется выражением

$$Da = a_{\max} / p_N, \quad (1)$$

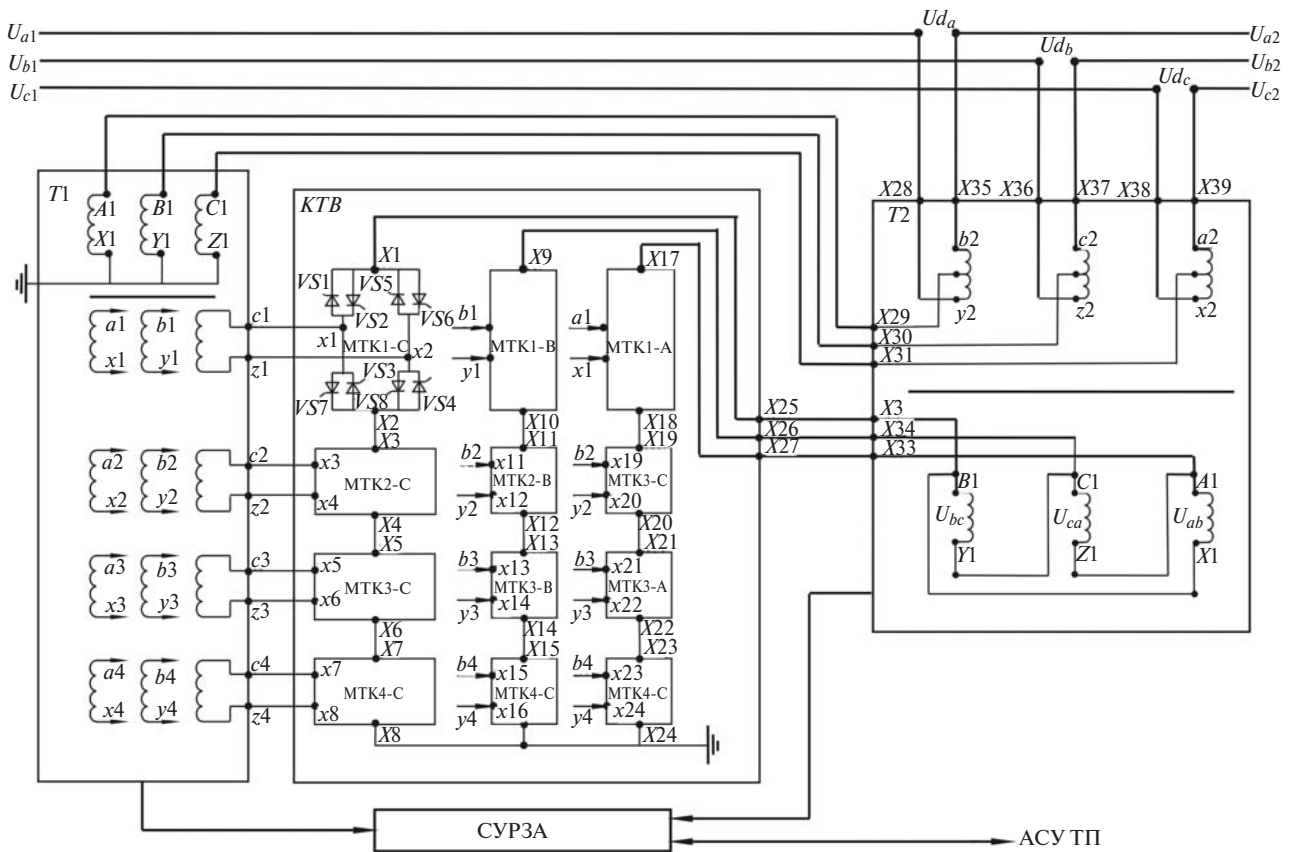


Рис. 1. Структурная схема ФПУ

где α_{\max} – заданный максимальный угол фазового сдвига, P_N – число ступеней регулирования.

Серийный трансформатор T_2 может быть собран по схеме Д/Ш–11 или по схеме Д/Ш–1, причем в треугольник соединяется вентильная обмотка трансформатора. В схеме ФПУ на рис. 1 шунтовой трансформатор T_1 имеет число секций $N=4$, серийный трансформатор T_2 собран с группой соединения Д/Ш–11, все уравнения и соотношения получены для этой группы соединения серийного трансформатора. Высоковольтный тиристорный коммутатор (КТВ) осуществляет переключение секций шунтового трансформатора, тиристорные ключи, образующие КТВ, работают при предельных углах регулирования в режиме «открыт»–«закрыт».

Упрощенная расчетная схема электропередачи с ФПУ с использованием средней точки сетевых обмоток серийного трансформатора показана на рис. 2, где последовательно с сопротивлениями линии $Z_{\text{Л}}$ включено ФПУ между двумя системами шин: передающей системой U_A, U_B, U_C и принимающей системой U_a, U_b, U_c . В шунто-

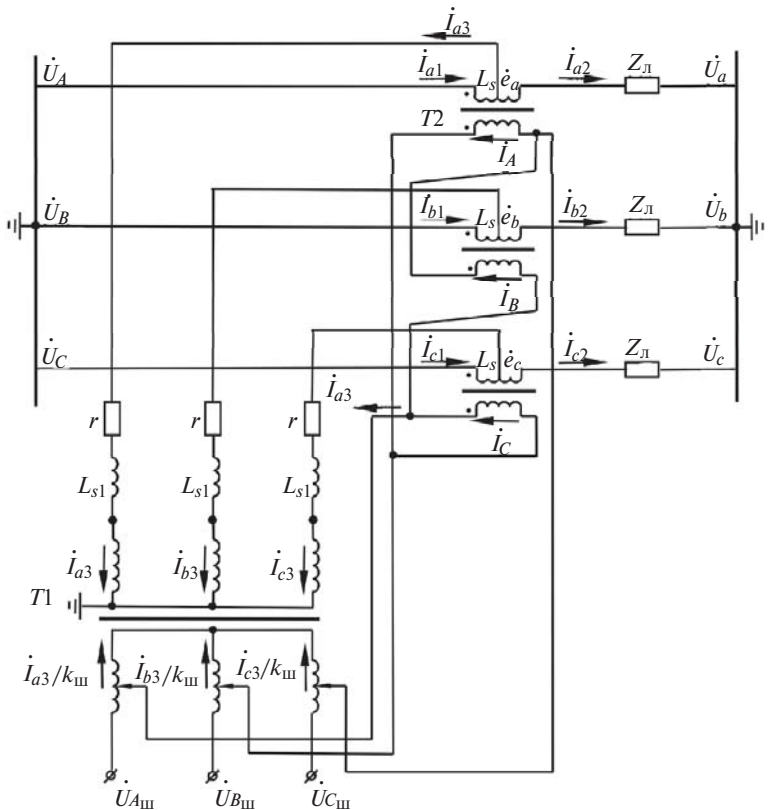


Рис. 2. Расчетная схема ФПУ упрощенной схемы электропередачи

вом трансформаторе $T1$ показана одна вторичная обмотка, например, первая секция с коэффициентом трансформации k_1 , который определяется отношением напряжения этой секции к фазному напряжению первичной обмотки $T1$. Коэффициент трансформации $k_{ш}$ других позиций регулирования (которые образуются различным сочетанием включения секций шунтового трансформатора) можно получить, используя соотношение $k_{ш} = k_1 p$, где p – определенная позиция регулирования, при этом p может принимать значения $1, 2, 3, \dots, p_N$. Не показан также высоковольтный тиристорный преобразователь, так как считаем его тиристорные ключи идеальными с длительностью проводящего состояния 360 эл. град.

Коэффициент трансформации серийного трансформатора k_2 определяется отношением напряжения полной сетевой обмотки к напряжению вентильной обмотки. Для схемы рис. 2 для вторичных напряжений шунтового трансформатора в режиме с отстающим вектором выходного напряжения ФПУ можно написать следующие уравнения:

$$\begin{aligned} U_{шA} &= (U_A + 0,5e_a)k_1 p; \\ U_{шB} &= (U_B + 0,5e_b)k_1 p; \\ U_{шC} &= (U_C + 0,5e_c)k_1 p; \end{aligned} \quad (2)$$

Вольтодобавочные напряжения можно описать следующими выражениями:

$$\begin{aligned} e_a &= (U_{шB} - U_{шC})k_2; \\ e_b &= (U_{шC} - U_{шA})k_2; \\ e_c &= (U_{шA} - U_{шB})k_2; \end{aligned} \quad (3)$$

где e_a, e_b, e_c – вольтодобавочные напряжения в каждой фазе.

Решая совместно уравнения (2) и (3), получаем значения вольтодобавочных напряжений для каждой фазы:

$$\begin{aligned} e_a &= (nU_{BC} - 1,5n^2U_A)/(1 + 0,75n^2); \\ e_b &= (nU_{CA} - 1,5n^2U_B)/(1 + 0,75n^2); \\ e_c &= (nU_{AB} - 1,5n^2U_C)/(1 + 0,75n^2); \end{aligned} \quad (4)$$

где $n = k_1 k_2 p$.

Для вторичных напряжений шунтового трансформатора при опережающем векторе выходного напряжения ФПУ напряжения трансформатора будут соответствовать уравнениям (2), а уравнения для напряжений вольтодобавки будут иметь вид:

$$\begin{aligned} e_a &= (U_{шC} - U_{шB})k_2; \\ e_b &= (U_{шA} - U_{шC})k_2; \\ e_c &= (U_{шB} - U_{шA})k_2; \end{aligned} \quad (5)$$

Решая совместно уравнения (2) и (5), получаем значения вольтодобавочных напряжений для каждой фазы при опережающем векторе выходного напряжения ФПУ:

$$\begin{aligned} e_a &= (-nU_{BC} - 1,5n^2U_A)/(1 + 0,75n^2); \\ e_b &= (-nU_{CA} - 1,5n^2U_B)/(1 + 0,75n^2); \\ e_c &= (-nU_{AB} - 1,5n^2U_C)/(1 + 0,75n^2); \end{aligned} \quad (6)$$

Анализируя выражения (4) и (6), можно сделать вывод, что при питании шунтового трансформатора от средней точки сетевой обмотки серийного трансформатора регулирование ФПУ осуществляется по продольно-поперечному принципу: вещественная часть комплексного значения векторов e_a, e_b, e_c обозначает поперечную составляющую вольтодобавочного напряжения, а мнимая часть – продольную составляющую.

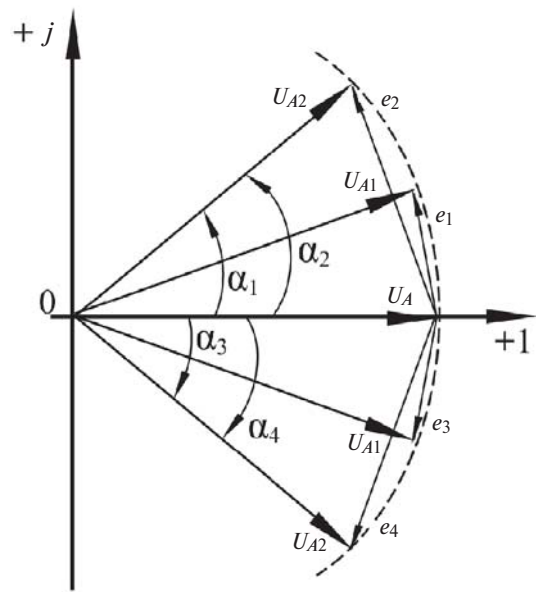


Рис. 3. Векторная диаграмма выходных напряжений ФПУ и вольтодобавочных напряжений $e_1 - e_4$ для фазы A

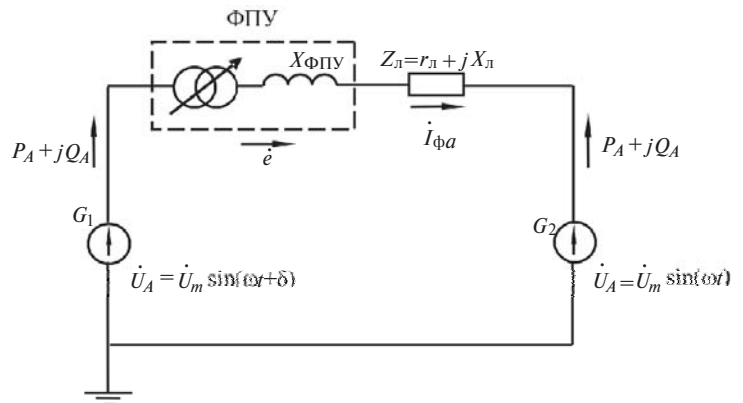


Рис. 4. Схема электропередачи с устройством ФПУ

Таблица 1

Степень регулирования, p	Угол регулирования, эл. град.	Значение							
		n	e_a , кВ	тока фазы А, А					
				Расчет			Моделирование		
Режим отстающих векторов выходного напряжения ФПУ									
1	1,333	0,0134	$2,95 \cdot e^{-j61}$	$484,37 \cdot e^{j30.5}$	$484,2 \cdot e^{j29}$	$10,23 \cdot e^{j119}$	$482 \cdot e^{j30}$	$482 \cdot e^{j29}$	$10 \cdot e^{j121}$
4	5,333	0,0536	$11,78 \cdot e^{-j63}$	$399,76 \cdot e^{j32}$	$398 \cdot e^{j26}$	$36,9 \cdot e^{j117}$	$398 \cdot e^{j31}$	$398 \cdot e^{j27}$	$36,3 \cdot e^{j120}$
8	10,666	0,1072	$23,48 \cdot e^{-j65}$	$310 \cdot e^{j33.5}$	$305,6 \cdot e^{j23}$	$56,5 \cdot e^{j114}$	$308 \cdot e^{j32}$	$308 \cdot e^{j22}$	$55 \cdot e^{j119}$
15	20	0,201	$43,56 \cdot e^{-j70}$	$168 \cdot e^{j37}$	$160 \cdot e^{j19.8}$	$55,4 \cdot e^{j110}$	$163 \cdot e^{j36}$	$163 \cdot e^{j20}$	$55 \cdot e^{j116}$
Режим опережающих векторов выходного напряжения									
1	1,333	0,0134	$2,95 \cdot e^{j121}$	$503 \cdot e^{j28}$	$503 \cdot e^{j30}$	$11,66 \cdot e^{-j60}$	$503 \cdot e^{j27}$	$503 \cdot e^{j30}$	$12 \cdot e^{-j59}$
4	5,333	0,0536	$11,77 \cdot e^{j123}$	$567 \cdot e^{j26.5}$	$565 \cdot e^{j31.7}$	$52,4 \cdot e^{-j58.4}$	$563 \cdot e^{j26.5}$	$562 \cdot e^{j32}$	$50 \cdot e^{-j61}$
8	10,666	0,1072	$23,5 \cdot e^{j125}$	$639 \cdot e^{j23}$	$629 \cdot e^{j33}$	$117 \cdot e^{-j57}$	$637 \cdot e^{j21}$	$635 \cdot e^{j32}$	$118 \cdot e^{-j61}$
15	20	0,201	$43,56 \cdot e^{j130}$	$786 \cdot e^{j19}$	$768 \cdot e^{j38}$	$262 \cdot e^{-j56}$	$765 \cdot e^{j19}$	$763 \cdot e^{j38}$	$263 \cdot e^{-j61}$

На рис. 3 показано семейство опережающих и отстающих векторов вольтодобавочных напряжений для фазы А.

Для расчета токов в схеме ФПУ согласно рис. 4 можно написать уравнения:

$$\begin{aligned} U_A - U_a + e_a &= Z_{л1} I_{a2} \\ U_B - U_b + e_b &= Z_{л2} I_{b2} \\ U_C - U_c + e_c &= Z_{л3} I_{c2} \end{aligned} \quad (7)$$

Зная параметры линии электропередачи и учитывая (4) и (6), можно определить токи в линии по фазам $I_{fa}(I_{a2})$, $I_{fb}(I_{b2})$, $I_{fc}(I_{c2})$:

$$\begin{aligned} I_{a2} &= (U_A - U_a + e_a) / Z_{л1} \\ I_{b2} &= (U_B - U_b + e_b) / Z_{л2} \\ I_{c2} &= (U_C - U_c + e_c) / Z_{л3} \end{aligned} \quad (8)$$

Первичные токи серийного трансформатора Т2 (рис. 2) и токи в первичной обмотке шунтового трансформатора Т1 определяются по выражениям:

$$\begin{aligned} I_A &= I_{a2} k_2; \quad I_{a3} = (I_C - I_B) k_{ш1} \\ I_B &= I_{b2} k_2; \quad I_{b3} = (I_A - I_C) k_{ш2} \\ I_C &= I_{c2} k_2; \quad I_{c3} = (I_B - I_A) k_{ш3} \end{aligned} \quad (9)$$

Ток на входе ФПУ будет определяться соотношением для фазы А:

$$I_{a1} = I_{a2} + I_{a3} \quad (10)$$

Для частного случая в табл. 1 даны значения векторов вольтодобавочных напряжений e_a фазы А

и токов фазы А (рис. 2) – для отстающих векторов выходного напряжения ФПУ для ступеней регулирования p при условии, что напряжения секций шунтового трансформатора: 1-я секция – 1,47 кВ; 2-я – 2,94 кВ; 3-я – 5,88 кВ; 4-я – 11,76 кВ; $k_2 = 2 / \sqrt{3}$; $Z_{л1} = 33 + j132,3$ Ом, а напряжение передающего конца линии электропередачи $U_A = 127$ кВ опережает по фазе напряжение приемного конца линии $U_a = 127$ кВ на 30° (эл.), угол регулирования $\alpha_{max} = 20^\circ$ (эл.). Для получения режима с отстающим вектором выходного напряжения ФПУ должны быть включены группы тиристоров VS1–VS2 и VS3–VS4 в мостах МТК (рис. 1). Токи в схеме рис. 2 I_{a1} , I_{a2} и I_{a3} получены при расчете по формулам (8)–(10). Так, для фазы А ток в режиме с отстающим вектором выходного напряжения с учетом формул (4) и (8) равен

$$I_{a2} = (U_A - U_a + (nU_{BC} - 1,5nU_2) / (1 + 0,75nU_2)) / Z_{л1} \quad (11)$$

В табл. 1 даны также значения векторов вольтодобавочных напряжений и токов фазы А (рис. 2) в схеме ФПУ с опережающим вектором выходного напряжения для ступеней регулирования p . При этом изменяется порядок переключения тиристоров в мостах: для получения режима с опережающим вектором выходного напряжения ФПУ должны включаться в мостах тиристоры VS5–VS6 и VS7–VS8 при схеме соединения серийного трансформатора D/III–11.

Ток в линии \dot{I}_{a2} в режиме с опережающим вектором выходного напряжения ФПУ с учетом формул (6) и (8)

$$\dot{I}_{a2} = (\dot{U}_A - \dot{U}_a - (n\dot{U}_{BC} - 1,5n\dot{U}_A) / (1 + 0,75n\dot{U}_2)) / Z_{\text{л}}. \quad (12)$$

Аналогичные уточняющие расчеты токов в схеме ФПУ были проведены с помощью имитационного моделирования в среде Matlab–Simulink для параметров ФПУ, указанных ранее.

Проведенные расчеты в модели показали практическую идентичность токов \dot{I}_{a1} , \dot{I}_{a2} и \dot{I}_{a3} с расчетными значениями, приведенными в табл. 1.

Анализируя полученные результаты (табл. 1) и допуская, что шунтовой и серийный трансформаторы идеальны и что по расчетной схеме рис. 4 серийный трансформатор включен последовательно в линию, можно сделать вывод:

токи на входе и выходе ФПУ при различных углах регулирования α практически равны по модулю, т.е. $|\dot{I}_{a1}| = |\dot{I}_{a2}|$;

фазовый сдвиг между этими токами равен углу регулирования α соответствующей ступени регулирования p шунтового трансформатора.

Эти выводы подтверждаются также приводимыми далее соотношениями.

Для рис. 2, если принять намагничивающий ток равным нулю, можно записать

$$\dot{I}_A w_1 = (\dot{I}_{a1} w_2 + \dot{I}_{a2} w_2) / 2. \quad (13)$$

С учетом коэффициента трансформации серийного трансформатора k_2 получим:

$$\dot{I}_A = k_2 / 2 (\dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2}). \quad (14)$$

Для всех режимов ток в шунтовом трансформаторе \dot{I}_{a3} отстает (режим с опережающим вектором выходного напряжения ФПУ) или опережает (режим с отстающим вектором выходного напряжения ФПУ) ток в фазе серийного трансформатора \dot{I}_A на 90° (эл.), поэтому

$$\dot{I}_{a3} = \dot{I}_C - \dot{I}_B = \sqrt{3} k_{\text{ш}} \dot{I}_A e^{j90}. \quad (15)$$

С другой стороны, из схемы рис. 2 видно, что

$$\dot{I}_{a3} = \dot{I}_{a1} - \dot{I}_{a2}. \quad (16)$$

Решая совместно уравнения (13)–(16), получаем соотношение для токов \dot{I}_{a1} и \dot{I}_{a2} в режиме с отстающим вектором выходного напряжения ФПУ:

$$\dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} e^{j(2 \arctg(\sqrt{3}/2 k_2 k_{\text{ш}}))}. \quad (17)$$

Для режима с опережающим вектором это соотношение будет иметь вид

$$\dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} e^{-j(2 \arctg(\sqrt{3}/2 k_2 k_{\text{ш}}))}. \quad (18)$$

На рис. 5,а и б показаны векторные диаграммы токов \dot{I}_{a1} , \dot{I}_{a2} и \dot{I}_{a3} для режимов с отстающим и опережающим вектором выходного напряжения ФПУ для углов регулирования α . Если в первом случае (рис. 5,а) ток \dot{I}_{a2} отстает от тока \dot{I}_{a1} на угол α , то во втором случае (рис. 5,б) ток \dot{I}_{a2} опережает ток \dot{I}_{a1} на угол α . Это связано с тем, что ток \dot{I}_{a3} , питающий шунтовой трансформатор от средней точки обмотки серийного трансформатора, меняет направление. Меняется и направление потока мощности, затрачиваемой на создание вольтодобавочного напряжения, эта мощность имеет, в основном, реактивный характер. Это связано с тем, что в сетевой обмотке серийного трансформатора вектор вольтодобавочного напряжения (например для фазы А) \dot{e}_a перпендикулярен вектору тока нагрузки

в линии \dot{I}_{a2} и равен примерно $\pm 90^\circ$ (эл.), что соответствует емкостному или индуктивному характеру режима работы сетевой обмотки серийного трансформатора ФПУ, т.е. речь идет о преобладании емкостной загрузки трансформатора, когда ФПУ работает в режиме с отстающим вектором напряжения, или индуктивной загрузки, когда ФПУ работает в режиме с опережающим вектором. Векторная разность токов \dot{I}_{a1} и \dot{I}_{a2} соответствует вектору тока \dot{I}_{a3} , который питает шунтовой трансформатор и способствует созданию вольтодобавочного напряжения \dot{e}_a . В [8] было показано, что наложение основного магнитного потока и потока, создаваемого током \dot{I}_{a3} , приводит к искажениям магнитного потока и его плотности на отдельных участках магнитопровода серийного трансформатора, что необходимо учитывать при проектировании магнитной системы трансформатора. Такие же явления возникают и в шунтовом трансформаторе.

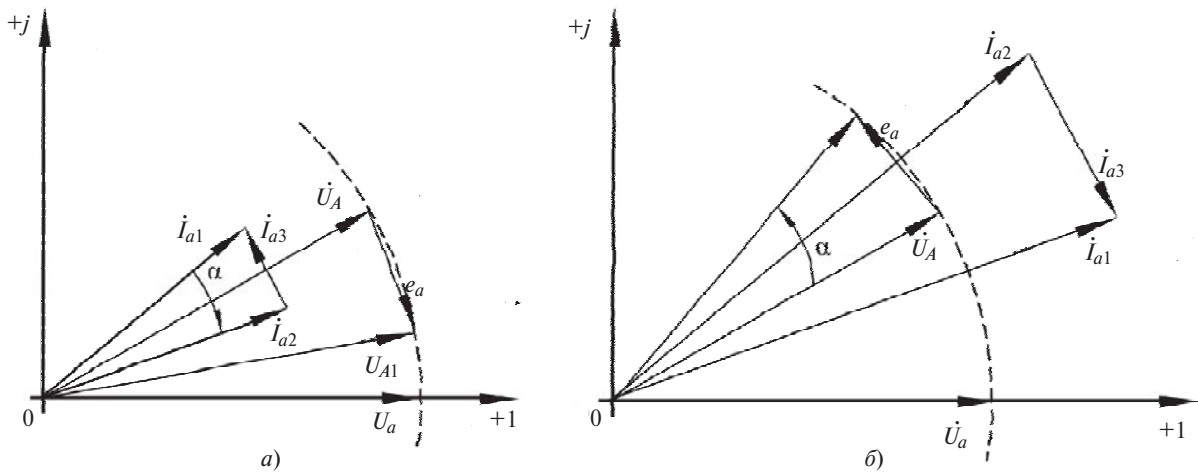


Рис. 5. Векторная диаграмма токов \dot{I}_{a1} , \dot{I}_{a2} , \dot{I}_{a3} : а – в режиме с отстающим вектором выходного напряжения ($\alpha = -20^\circ$ (эл.)); б – с опережающим вектором ($\alpha = 20^\circ$ (эл.))

Уравнения (8) можно представить в другом виде, например для фазы А:

$$\dot{I}_{a2} = (\dot{U}_A - \dot{U}_a) / Z_{л} + \dot{e}_a / Z_{л}.$$

Первая составляющая этого выражения $\dot{I}_{au} = (\dot{U}_A - \dot{U}_a) / Z_{л}$ является постоянной величиной, не зависящей от способов регулирования фазового сдвига. Вторая часть этого выражения $\dot{I}_{ae} = \dot{e}_a / Z_{л}$ является переменной, создаваемой вольтодобавочным напряжением \dot{e}_a , и зависит от ее значения, фазового сдвига и способов регулирования фазового сдвига. Векторная сумма этих двух величин и является выходным током ФПУ \dot{I}_{a2} :

$$\dot{I}_{a2} = \dot{I}_{au} + \dot{I}_{ae}.$$

На векторных диаграммах рис. 6, а и б для углов регулирования $\alpha = \pm 20^\circ$ (эл.) показано, как ток на выходе ФПУ \dot{I}_{a2} уменьшается или увеличивается в зависимости от режима регулирования ФПУ: с отстающим или опережающим вектором выходного напряжения ФПУ. С изменением тока \dot{I}_{a2} связано изменение потоков мощности на выходе ФПУ. В большом диапазоне изменения параметров ВЛ вектор тока \dot{I}_{ae} под воздействием вольтодобавочного напряжения будет направлен встречно (режим с отстающим вектором выходного напряжения ФПУ) по отношению к неизменяющемуся от угла регулирования току \dot{I}_{au} или согласно (режим опережающего вектора выходного напряжения ФПУ), что соответственно уменьшает или увеличивает значе-

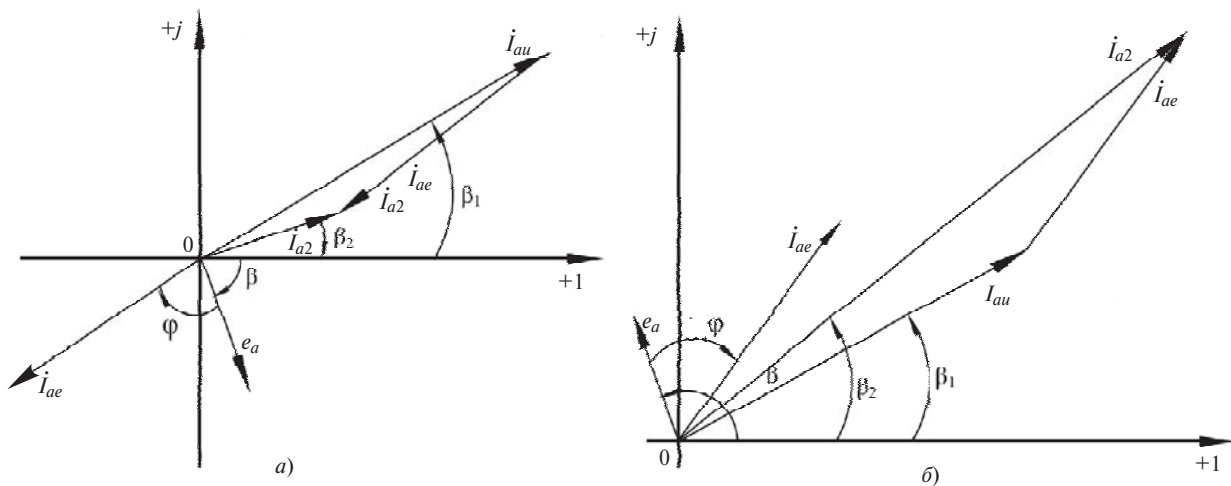


Рис. 6. Векторная диаграмма тока \dot{I}_{a2} , получаемого под воздействием вольтодобавочного напряжения: а – $\alpha = -20^\circ$ (эл.); б –

ние тока в линии, зависимое от напряжений U_A и U_a .

Рассчитанные при моделировании в Matlab–Simulink перетоки мощности для фазы A в схеме рис. 4 с учетом параметров указанного ранее примера представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что переток активной мощности в ВЛ 220 кВ осуществляется от генератора G_1 к G_2 , который является потребителем активной мощности наряду с активным сопротивлением линии $R_{л}$, а источником реактивной мощности в данном примере является генератор G_2 в обоих режимах и генератор G_1 только в режиме с опережающим вектором выходного напряжения ФПУ. В балансе реактивной мощности участвуют потери реактивной мощности в индуктивных сопротивлениях линии и ФПУ ($X_{л}$, $X_{ФПУ}$), реактивная мощность шунтового трансформатора Q_3 , которая расходуется на создание вольтодобавочного напряжения в линии электропередачи. В табл. 2 показано, что при углах регулирования $\alpha > 10^\circ$ (эл.) в режиме с опережающим вектором выходного напряжения циркулирующая в ФПУ реактивная мощность значительно больше, чем в режиме с отстающим вектором выходного напряжения, т.е. режим с опережающим вектором при больших углах регулирования будет заметно влиять на искажения и плотность результирующего магнитного потока в магнитопроводах шунтового и серийного трансформаторов.

Таблица 2

Угол регулирования α , эл. град.	Перетоки мощности				
	активной, МВт		реактивной, Мвар		
	P_1	P_2	Q_1	Q_2	Q_3
Режим с отстающим вектором					
0	60,90	-53,2	0,96	29,2	~0
-5	50,34	-45,0	-1,54	22,2	-4,64
-10	39,44	-35,9	-2,84	15,6	-7,06
-20	20,50	-19,5	-3,00	6,6	-7,1
Режим с опережающим вектором					
0	60,90	-53,2	0,96	29,20	0
5	71,40	-60,8	-4,44	37,34	6,58
10	80,48	-66,96	9,00	45,10	14,74
20	95,24	-75,68	18,40	60,30	32,22

Циркулирующая реактивная мощность Q_3 для всех углов регулирования и режимов аналитически

определяется выражением через полную комплексную мощность

$$S = e_a I_{a2},$$

причем аргумент комплексного числа S равен $\pm 90^\circ$ (эл.), что показывает: эта мощность имеет практически реактивный характер. А значения S соответствуют значениям Q_3 в табл. 2.

Анализируя полученные в табл. 2 данные, можно также сделать вывод, что генерация реактивной мощности на передающем конце ВЛ 220 кВ (G_1) в режиме с опережающим вектором выходного напряжения ФПУ существенно возрастает по мере увеличения угла регулирования α . Особенно это заметно для больших значений угла α .

Как показали дальнейшие исследования, приведенный пример для частного случая параметров схемы принципиально имеет общий характер изменения электромагнитных процессов при регулировании фазового сдвига выходного напряжения ФПУ с тиристорным управлением.

Выводы. 1. Для одноцепной двухмашинной электрической системы со схемой ФПУ с тиристорным управлением и симметричным регулированием выходного напряжения линейные токи на входе и выходе ФПУ практически равны по модулю, но отличаются аргументом на значение фазового сдвига выходного напряжения.

2. Ток в линии электропередачи сдвинут относительно вольтодобавочного напряжения e практически на угол $\pm 90^\circ$ (эл.). Поэтому мощность, потребляемая шунтовым трансформатором, питающимся от средней точки сетевой обмотки серийного трансформатора, имеет реактивный характер. В режиме с отстающим вектором выходного напряжения ФПУ эта мощность имеет емкостный характер, а в режиме с опережающим вектором выходного напряжения – индуктивный характер.

3. Для одного и того же угла регулирования фазового сдвига реактивная мощность в шунтовом трансформаторе, питающемся от средней точки сетевой обмотки серийного трансформатора, в режиме с опережающим вектором выходного напряжения ФПУ существенно больше, чем в режиме с отстающим вектором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Б.А. Контроль состояния устройств регулирования напряжения под нагрузкой. – ЭЛЕКТРО, 2008, № 4, с. 41–46.
- Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. – М.: Торус-Пресс, 2011, 312 с.
- Стедьмаков В.Н., Жмуров В.П., Тарасов А.Н., Гринштейн Б.И., Тузлукова Е.В. Фазоворотные устройства с тиристорным управлением. – Энергетик, 2010, № 8, с. 20–23.

4. Шакарян Ю.Г., Фокин В.К., Лихачев А.П. Установившиеся режимы электроэнергетических систем с фазоповоротными устройствами. Ч.1. — Электричество, 2014, № 7, с. 16–25.

5. Шакарян Ю.Г., Фокин В.К., Лихачев А.П. Установившиеся режимы электроэнергетических систем с фазоповоротными устройствами. Ч.2. — Электричество, 2014, № 8, с. 9–18.

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 11, pp. 4–11.

Analysis of Electromagnetic Processes in Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer

STEL'MAKOV Vadim Nikolayevich (JSC «ENIN named G.M. Krzhizhanovsky», Moscow, Russia) — Senior Scientific Researcher

TARASOV Anatolii Nikolaevich (JSC «ENIN named G.M. Krzhizhanovsky», Moscow, Russia) — Senior Scientific Researcher

Creation of Flexible AC Transmission Systems (FACTS) and usage of Phase Shifting Transformers (PST) with thyristor control is one of the effective ways to improve stability and supply security of electric power systems (EPS) and to rise capacity of electric networks. These devices allow to regulate power flows at the pace of electromagnetic and electromechanical processes in EPS which provides effectiveness of power flows control. Fast response of control devices is one of the basic requirements for interconnections EPS. The article considers the analysis of electromagnetic processes in the PST with thyristor control, which is designed for continuous control of power flow in electrical networks with parametric regime and heterogeneity. Regulation of power flows is accomplished by the phase shift of the output voltage with high voltage thyristor switches. Mathematical model of PST with thyristor control included in a two-machine EPS is developed. Analysis of electromagnetic processes in the PST was considered using this mathematical model. Expressions are obtained for the boost voltage and currents flowing in series and shunt transformers adjusted by longitudinal – transverse method. The character and values are derived for the capacities circulating in the PST Set System.

Key words: electric power system, phase shifting transformer, thyristor control, booster voltage, phase shift, shunt transformer, series transformer, power flow

REFERENCES

1. Alekseyev B.A. *Elektro – in Russ. (Electro)*, 2008, No. 4, pp. 41–46.

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

3. Stelmakov V.N., Zhmurov V.P., Tarasov A.N., Grinstein B.I., Tuzlukova E.V. *Energetik – in Russ. (Power Engineering Specialist)*, 2010, No. 8, pp. 20–23.

4. Shakaryan Yu.G., Fokin V.K., Likhachev A.P. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 7, pp. 16–25.

5. Shakaryan Yu.G., Fokin V.K., Likhachev A.P. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 8, pp. 9–18.

6. Patent RF No. 2450420. *Poluprovodnikovoe fazopovortnoe ustroystvo* (Semiconducting Phase-Shifting Device)/V.P. Zhmurov, V.N. Stel'makov, A.N. Tarasov, I.I. Kazennova. — Bulletin of inventions, 2012, No. 13.

7. Patent RF No. 106060. *Fasopovortnoe ustroystvo (Phase-shifting Device)*/ V.P. Zhmurov, V.N. Stel'makov, A.N. Tarasov, B.I. Grinstein. — Bulletin of invention, 2011, No. 8.

8. Zhmurov V.P., Stelmakov V.N., Tarasov A.N. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii nauk. Energetika – in Russ. (Proc. of Russian Academy of Sciences. Power Engineering)*, 2010, No. 5, pp. 132–131.

9. Stelmakov V.N., Tarasov A.N., Tuzov P.V. *Electro – in Russ. (Electro)*, 2015, No.1, pp. 2–8.

10. Riemer B., Bonmann D., Hameyer K. Flux distribution in transformer cores of Phase-Shifting transformers. — CIGRE SC A2 & C4 Joint Colloquium 2013, Zurich (Switzerland).

6. Патент 2450420 (РФ). Полупроводниковое фазоповоротное устройство/В.П. Жмуров, В.Н. Стельмаков, А.Н. Тарасов, И.И. Казеннова. – БИ, 2012, № 13.

7. Патент 106060 (РФ). Фазоповоротное устройство/В.П. Жмуров, В.Н. Стельмаков, А.Н. Тарасов, Б.И. Гринштейн. – БИ, 2011, № 8.

8. Жмуров В.П., Стельмаков В.Н., Тарасов А.Н. Применение фазоповоротных устройств с тиристорным управлением при больших углах регулирования фазового сдвига. – Изв. РАН. Энергетика, 2010, № 5, с.132–141.

9. Стельмаков В.Н., Тарасов А.Н., Тузов П.В. Применение фазоповоротных устройств с тиристорным управлением в электроэнергетических системах (ЭЭС) и способы повышения надежности ЭЭС. – ЭЛЕКТРО, 2015, № 1, с. 2–8.

10. Riemer V., Vonmann D., Hameyer K. Flux distribution in transformer cores of Phase-Shifting transformers. – CIGRE SC A2 & C4 Joint Colloquium 2013, Zurich (Switzerland).

[01.07.15]

Авторы: Стельмаков Вадим Николаевич окончил энергетический факультет Московского института инженеров транспорта в 1962 г. Старший научный сотрудник ОАО «ЭНИН им. Г.М. Кржижановского».

Тарасов Анатолий Николаевич окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института в 1963 г. Старший научный сотрудник ОАО «ЭНИН им. Г.М. Кржижановского».