

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ВНЕШНИХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков
г. Челябинск, ЮУрГУ

ANALYSIS OF SYNCHRONOUS GENERATOR EXCITATION SYSTEM OPERATION AT VARIOUS KINDS OF NON-SYMMETRICAL EXTERNAL SHORT CIRCUITS

M.E. Goldstein, K.E. Gorshkov
Chelyabinsk, SUSU

Рассмотрена работа системы самовозбуждения синхронного генератора, выполненной с одноканальной и многоканальной СУТ с различными способами синхронизации, при внешних несимметричных коротких замыканиях. Показаны достоинства и недостатки различных способов управления. Представлены выражения для расчета напряжения возбуждения, кратности форсировки генератора по напряжению, длительностей работы тиристоров.

Ключевые слова: короткое замыкание, КЗ, система возбуждения генератора, система управления тиристорами, многоканальная СУТ, одноканальная СУТ, синхронизация.

The synchronous generator excitation system with single- and multi-channel rectifier control systems at various kinds of non-symmetrical external short circuits is described. The rectifier control systems synchronized relative to line or phase voltages. The advantages and disadvantages of the synchronization methods are reviewed. For analysis generator operation, the mathematical expressions for the excitation voltage, field-forcing ratio and operating ranges are calculated.

Keywords: short circuits, generator excitation system, thyristor control system, multi-channel thyristor control system, single-channel thyristor control system, synchronization.

В соответствии с требованиями ГОСТ 21558-2000 системы самовозбуждения (ССВ) турбогенераторов должны обеспечивать правильную работу синхронных машин, как в нормальном режиме, так и при возникновении аварий, в частности, коротких замыканий (КЗ), в электроэнергетических системах [1]. В отличие от систем независимого возбуждения в ССВ величина напряжения и тока ротора зависят от величины напряжения на выводах статорной обмотки синхронной машины, в связи с чем реальная кратность форсировки по напряжению турбогенератора при внешних КЗ непосредственно связана с видом и удаленностью короткого замыкания [2].

На рис. 1 представлена схема синхронного генератора (СГ) с тиристорной системой самовозбуждения (СТС). В основу СТС положен трехфазный мостовой преобразователь с одноканальной или многоканальной синхронной системой фазового управления тиристорами (ОСУТ, МСУТ).

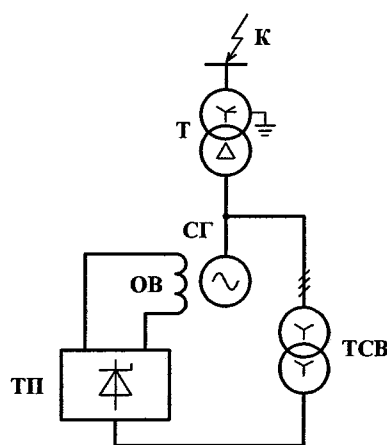


Рис. 1. Синхронный генератор с СТС (СГ – синхронный генератор, Т – повышающий трансформатор, ТСВ – трансформатор системы возбуждения, ТП – тиристорный преобразователь, ОВ – обмотка возбуждения)

Отличительной особенностью синхронной СУТ является отсчет подачи импульса управления от определенной точки напряжения сети, питающей выпрямитель [3]. Существует несколько способов реализации работы СУТ – синхронизации по фазным или линейным напряжениям. В первом случае отсчет углов управления происходит от момента перехода через нуль фазного напряжения сети, во втором случае – линейного.

Короткое замыкание во внешней сети приводит к снижению напряжения на выводах генератора, в связи с чем для поддержания напряжения преобразователь переводится в режим с нулевым углом управления – режим форсировки. При форсировке напряжение обмотки возбуждения (ОВ) определяется величинами и углами сдвига фаз напряжений, питающих преобразователь. Поэтому реальная кратность форсировки будет зависеть как от вида СУТ, так и от способа синхронизации.

Ряд вопросов работы СТС при внешних несимметричных КЗ затронут в работе [4], в частности, рассмотрена работа МСУТ с синхронизацией по линейным напряжениям сети на мощных синхронных генераторах. Широкое применение МСУТ с синхронизацией по линейным напряжениям обусловлено высоким быстродействием и правильной работой тиристоров при несимметричных КЗ. Однако такой вариант не лишен и ряда недостатков.

Анализ величин и фаз питающих напряжений тиристорного преобразователя СТС. При внешнем несимметричном КЗ величины и фазы остаточных напряжений на выводах СГ зависят от вида КЗ и расстояния до точки короткого замыкания.

На рис. 2 изображены расчетные схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей для начального момента времени при разных видах внешних КЗ (n) . Синхронный генератор представлен сверхпереходными значениями ЭДС $\dot{E}_\phi''$ и индуктивного сопротивления по продольной

оси x_d'' , а также сопротивлением обратной последовательности x_2 . Индуктивные сопротивления трансформатора и элементов внешней сети заменены эквивалентными сопротивлениями $x_{вн(1)}$, $x_{вн(2)}$, $x_{вн(0)}$. Схема и группа соединения обмоток повышающего трансформатора $Yn/D-11$.

Обозначим сумму внешнего эквивалентного сопротивления прямой последовательности и дополнительного сопротивления в точке КЗ как $x_{вн}^{(n)}$. Пренебрегая активными сопротивлениями элементов, остаточные напряжения на выводах СГ можно рассчитать по выражениям:

$$\begin{cases} |\dot{U}_A| = \frac{k \cdot x_2 + x_{вн}^{(n)}}{x_d'' + x_{вн}^{(n)}} \cdot |\dot{E}_\phi''|; \\ |\dot{U}_B| = |\dot{U}_C| = \frac{\sqrt{(x_{вн}^{(n)} - k \cdot x_2)^2 + x_{вн}^{(n)} \cdot k \cdot x_2}}{x_d'' + x_{вн}^{(n)}} \cdot |\dot{E}_\phi''|, \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{где } k = \begin{cases} 0, & \text{для } K^{(3)}, \\ 1, & \text{для } K^{(1)}, \\ -1, & \text{для } K^{(2)} \text{ и } K^{(1,1)}. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varphi_A = -\frac{\pi}{2}; \\ \varphi_B = \pi - \arctg \left| \frac{x_{вн}^{(n)} + k \cdot x_2}{\sqrt{3}(x_{вн}^{(n)} - k \cdot x_2)} \right|; \\ \varphi_C = \arctg \left| \frac{x_{вн}^{(n)} + k \cdot x_2}{\sqrt{3}(x_{вн}^{(n)} - k \cdot x_2)} \right|. \end{cases} \quad (2)$$

Выражения справедливы для внешнего двухфазного КЗ между фазами «А» и «В» и однофазного КЗ фазы «С». Для расчета величин при других видах КЗ достаточно изменить индексы в записи напряжений в соответствии с комбинацией замкнутых фаз.

В табл. 1 представлены величины остаточных напряжений для турбогенератора ТГВ-200-2М в начальный момент времени при разных видах внешних КЗ за повышающим трансформатором ($E_r = 1,14$ о.е., $x_d'' = 0,224$ Ом, $x_2 = 0,273$ Ом, $x_T = 0,112$ Ом, $x_{T0} = 0,85 \cdot x_T$). По данным таблицы построена векторная диаграмма (рис. 3).

Таблица 1

Остаточное напряжение на выводах генератора
ТГВ-200-2М в момент КЗ за трансформатором

Вид	Напряжение, о.е.		Фаза, эл. град		
	U_A	U_B, U_C	φ_A	φ_B	φ_C
$K^{(3)}$	0,380	0,380	-90	150	30
$K^{(2)}$	0,354	1,069		170,5	9,5
$K^{(1,1)}$	0,234	1,111		173,9	6,1
$K^{(1)}$	1,208	0,717		122,6	57,4

Рис. 2. Схемы замещения прямой (1), обратной (2) и нулевой (0) последовательностей при внешнем несимметричном КЗ

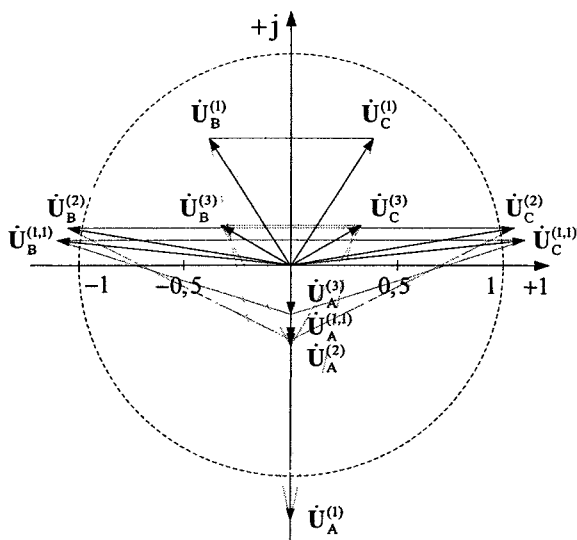


Рис. 3. Векторная диаграмма напряжений на выводах генератора ТГВ-200-2М в момент КЗ за трансформатором

Воспользуемся формулами (1) и (2) и запишем выражения для расчета величин и фаз линейных питающих напряжений тиристорного преобразователя в именованных единицах.

$$\begin{cases} |\dot{U}_{BC}| = \frac{\sqrt{3}(x_{BH}^{(n)} - k \cdot x_2)}{K_{TCB} \cdot (x_d'' + x_{BH}^{(n)})} \cdot |\dot{E}_\Phi''|, \\ |\dot{U}_{AB}| = |\dot{U}_{CA}| = \\ = \frac{\sqrt{3} \sqrt{(x_{BH}^{(n)} + k \cdot x_2)^2 - x_{BH}^{(n)} \cdot k \cdot x_2}}{K_{TCB} \cdot (x_d'' + x_{BH}^{(n)})} \cdot |\dot{E}_\Phi''|, \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{где } k = \begin{cases} 0, & \text{для } K^{(3)}, \\ 1, & \text{для } K^{(1)}, \\ -1, & \text{для } K^{(2)} \text{ и } K^{(1,1)}. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varphi_{BC} = \pi, \\ \varphi_{CA} = +\arctg \frac{\sqrt{3}(x_{BH}^{(n)} + k \cdot x_2)}{x_{BH}^{(n)} - k \cdot x_2}, \\ \varphi_{AB} = -\arctg \frac{\sqrt{3}(x_{BH}^{(n)} + k \cdot x_2)}{x_{BH}^{(n)} - k \cdot x_2}. \end{cases} \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) справедливы как для начального, так и для квазиустановившегося интервалов форсировки генератора. Во втором случае, вместо значения сверхпереходной ЭДС следует подставить значение в квазиустановившемся режиме, а сверхпереходное сопротивление генератора заменить синхронным сопротивлением по продольной оси.

Оценка величины напряжения обмотки возбуждения при внешнем КЗ. Величина вы-

прямоугольного напряжения в момент КЗ зависит как от величин и фаз линейных напряжений, питающих тиристорный преобразователь, так и от способа синхронизации СУТ.

Для ССВ с многоканальной СУТ, синхронизи-
рованной по линейным напряжениям сети, при рабо-
те с нулевым углом управления момент подачи
управляющего импульса на тиристор совпадает с
моментом прикладывания к нему положительного
напряжения независимо от вида КЗ. В ССВ с МСУТ
с синхронизацией по фазным напряжениям и ОСУТ
возможно запаздывание или преждевременное появ-
ление управляющих импульсов в зависимости от
вида и величины несимметрии питающих напряже-
ний. Запаздывание импульсов управления приводит
к изменению величины выпрямленного напряжения
и перераспределению длительностей работы тири-
сторов. Преждевременная подача управляющего
импульса не оказывает влияния на распределение
длительностей работы тиристоров, так как коммута-
ция тиристора начинается при появлении на нем по-
ложительного напряжения.

Обозначим интервалы запаздывания управляющих импульсов как $\varepsilon_{1,4}$, $\varepsilon_{2,5}$ и $\varepsilon_{3,6}$ в соответствии с порядковыми номерами тиристоров. В этом случае среднее значение за период выпрямленного напряжения преобразователя без учета длительностей коммутации тиристоров можно записать в виде суммы трех интегралов

$$U_{d0} = \frac{1}{\pi \cdot K_{TCB}} \left[\int_{-\frac{\pi}{2} + \varepsilon_2}^{-\alpha_1 + \varepsilon_3} |\dot{U}_{CAm}| \cdot \cos(\omega t + \varphi_{CA}) dt + \right. \\ \left. + \int_{-\alpha_1 + \varepsilon_3}^{\alpha_1 + \varepsilon_1} |\dot{U}_{CBm}| \cdot \cos(\omega t) dt + \right. \\ \left. + \int_{\alpha_1 + \varepsilon_1}^{\frac{\pi}{2} + \varepsilon_2} |\dot{U}_{ABm}| \cdot \cos(\omega t + \varphi_{AB}) dt \right],$$

откуда

$$U_{d0} = \frac{\sqrt{2}}{\pi \cdot K_{TCB}} (|\dot{U}_{AB}| \cos(\varepsilon_{1,4}) + \\ + |\dot{U}_{BC}| \cos(\varepsilon_{2,5}) + |\dot{U}_{CA}| \cos(\varepsilon_{3,6})). \quad (5)$$

Расчетные выражения для интервалов запаздывания включения тиристоров при различных видах внешних КЗ сведены в табл. 2.

Если рассчитываемый интервал имеет отрицательный знак, то он является интервалом преждевременной подачи импульса управления. В таком случае в выражение (5) следует подставлять нулевое значение.

На рис. 4 изображены графики напряжений анодной, катодной групп тиристоров и выпрямленного напряжения для СТС турбогенератора ТГВ-200-2М с различными способами управления при двухфазном, двухфазном на землю и однофазном КЗ

за повышающим трансформатором. Кривые построены в относительных единицах для начального этапа форсировки при нулевом угле управления

и без учета длительностей коммутации тиристоров. Значения приведены к фазному номинальному напряжению обмотки НН трансформатора ССВ,

Таблица 2

Интервалы запаздывания включения тиристоров при внешнем несимметричном КЗ

Интервал, рад	Способ управления							
	МСУТ		ОСУТ					
	U_Φ	U_L	U_A	U_B	U_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
$\varepsilon_{1,4}$	$\frac{\pi}{6} - A$	0	$\frac{\pi}{6} - A$	$B - A$	$\frac{\pi}{3} - A - B$	$2(\frac{\pi}{6} - A)$	$\frac{\pi}{6} - A$	0
$\varepsilon_{2,5}$	$\frac{\pi}{6} - B$		0	$B - \frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{6} - B$	$\frac{\pi}{6} - A$	0	$A - \frac{\pi}{6}$
$\varepsilon_{3,6}$	$A + B - \frac{\pi}{3}$		$A - \frac{\pi}{6}$	$A + B - \frac{\pi}{3}$	$A - B$	0	$A - \frac{\pi}{6}$	$2(A - \frac{\pi}{6})$

Примечание. $A = \arctg \left| \frac{x_{BH}^{(n)} - k \cdot x_2}{\sqrt{3}(x_{BH}^{(n)} + k \cdot x_2)} \right|$, $B = \arctg \left| \frac{x_{BH}^{(n)} + k \cdot x_2}{\sqrt{3}(x_{BH}^{(n)} - k \cdot x_2)} \right|$.

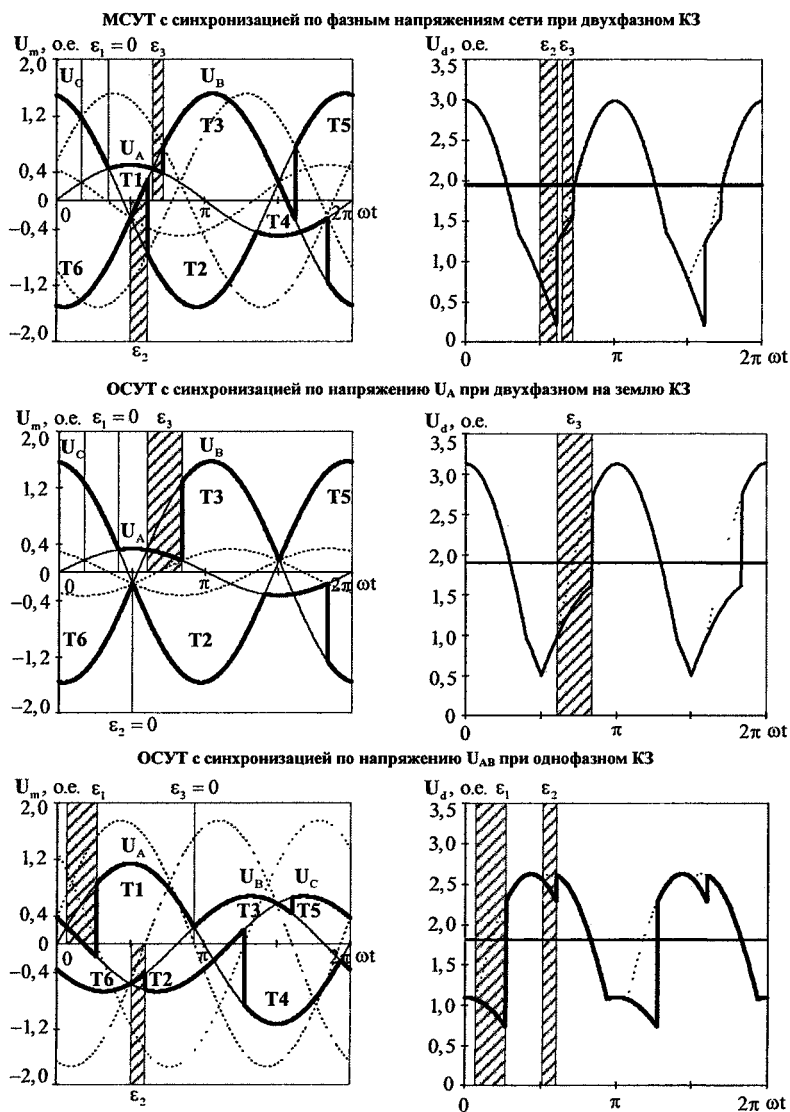


Рис. 4. Напряжения на элементах тиристорной системы самовозбуждения генератора ТГВ-200-2М при несимметричном КЗ за повышающим трансформатором

равному 603 В. Интервалы запаздывания отмечены в виде заштрихованных областей. При синхронизации по фазным напряжениям управляющий импульс подается на тиристор с задержкой в 30 эл. град с момента перехода через нуль фазного напряжения сети. При синхронизации по линейным напряжениям – в момент перехода через нуль линейного напряжения. На графике для МСУТ с синхронизацией по фазным напряжениям импульс управления на первом и четвертом тиристорах появляется раньше положительного напряжения, в то время как у остальных тиристоров импульсы запаздывают. На графиках выпрямленного напряжения пунктирной линией отмечены кривые с нулевыми интервалами запаздывания, соответствующие МСУТ с синхронизацией по линейным напряжениям. Средние значения выпрямленного напряжения в относительных единицах для МСУТ и ОСУТ с различными способами синхронизации при всех видах несимметричных КЗ представлены в табл. 3.

Оценка величины кратности форсировки возбуждения по напряжению. Кратности форсировки по напряжению турбогенератора соответствует потолочное установившееся напряжение ССВ, выраженное в долях номинального напряжения ОВ [1]

$$K_U = \frac{U_d}{U_{\text{ном}}} \quad (6)$$

В квазиустановившемся режиме ЭДС генератора напрямую зависит от величины тока возбуждения, что в свою очередь затрудняет оценку кратности форсировки в аналитической форме. В данном случае для сравнения эффективности различных способов управления ограничимся оценкой кратности напряжения возбуждения на начальном этапе форсирования.

Уравнение преобразователя в номинальном режиме:

$$U_{\text{дном}} = \frac{3\sqrt{6} \cdot E_{\text{уном}}}{\pi} \cos(\alpha_{\text{ном}}) - \frac{3}{\pi} I_{\text{дном}} x_{\gamma} \quad (7)$$

Воспользуемся формулами (5) и (7) и выразим кратность форсировки на начальном этапе через параметры элементов

$$K_U = \frac{E_r^*}{\cos(\alpha_{\text{ном}})} \cdot \frac{\sqrt{(x_{\text{вн}}^{(n)} + k \cdot x_2)^2 - x_{\text{вн}}^{(n)} \cdot k \cdot x_2}}{x_d'' + x_{\text{вн}}^{(n)}} \cdot \{\cos(\varepsilon_{1,4}) + \cos(\varepsilon_{3,6})\} + (x_{\text{вн}}^{(n)} - k \cdot x_2) \cdot \cos(\varepsilon_{2,5}) \quad (8)$$

Значения кратности форсировки для генератора ТГВ-200-2М приведены в табл. 4. Угол управления тиристорами в номинальном режиме $\alpha_{\text{ном}} = 63$ эл. град.

Оценка длительностей работы тиристоров. Соотношение длительностей работы тиристоров зависит от асимметрии питающих напряжений преобразователя. Найдем интервалы проводимости тиристоров без учета длительностей коммутаций

$$\begin{cases} \Delta t_{1,4} = \alpha_3 - \alpha_1, \\ \Delta t_{2,5} = \pi + \alpha_1 - \alpha_2, \\ \Delta t_{3,6} = \pi + \alpha_2 - \alpha_3. \end{cases} \quad (9)$$

В формуле (9) углы управления записаны относительно точки перехода через нуль напряжения фазы «А». Выразим длительности работы тиристоров через интервалы запаздывания:

$$\begin{cases} \Delta t_{1,4} = \pi - 2 \cdot \arctg \left| \frac{x_{\text{вн}}^{(n)} - k \cdot x_2}{\sqrt{3}(x_{\text{вн}}^{(n)} + k \cdot x_2)} \right| + \varepsilon_3 - \varepsilon_1; \\ \Delta t_{2,5} = \frac{\pi}{2} + \arctg \left| \frac{x_{\text{вн}}^{(n)} - k \cdot x_2}{\sqrt{3}(x_{\text{вн}}^{(n)} + k \cdot x_2)} \right| + \varepsilon_1 - \varepsilon_2; \\ \Delta t_{3,6} = \frac{\pi}{2} + \arctg \left| \frac{x_{\text{вн}}^{(n)} - k \cdot x_2}{\sqrt{3}(x_{\text{вн}}^{(n)} + k \cdot x_2)} \right| + \varepsilon_2 - \varepsilon_3. \end{cases} \quad (10)$$

Таблица 3

Напряжение возбуждения генератора ТГВ-200-2М при несимметричном КЗ за повышающим трансформатором

Вид КЗ	Способ управления							
	МСУТ		ОСУТ					
	U _Л	U _Ф	U _А	U _В	U _С	U _{АВ}	U _{ВС}	U _{СА}
K ⁽²⁾	2,01	1,94	1,92	2,00	1,73	2,01	1,92	1,54
K ^(1,1)	2,04	1,92	1,90	2,01	1,64	2,04	1,90	1,30
K ⁽¹⁾	2,02	1,96	1,97	1,72	2,02	1,84	1,97	2,02

Примечание. Значения приведены к напряжению обмотки НН трансформатора ССВ $U_{\text{фном}} = 603$, В.

Таблица 4

Кратность форсировки по напряжению генератора ТГВ-200-2М на начальном этапе при несимметричном КЗ за повышающим трансформатором

Вид КЗ	Способ управления							
	МСУТ		ОСУТ					
	U _Л	U _Ф	U _А	U _В	U _С	U _{АВ}	U _{ВС}	U _{СА}
K ⁽²⁾	1,90	1,83	1,81	1,88	1,63	1,90	1,81	1,45
K ^(1,1)	1,92	1,81	1,79	1,89	1,55	1,92	1,80	1,23
K ⁽¹⁾	1,90	1,85	1,86	1,62	1,90	1,73	1,86	1,90

Таблица 5

Длительности интервалов проводимости тиристоров ССВ генератора ТГВ-200-2М
при несимметричном КЗ за повышающим трансформатором

Вид КЗ	Тиристор	Способ управления							
		МСУТ		ОСУТ					
		U _Л	U _Ф	U _А	U _В	U _С	U _{АВ}	U _{ВС}	U _{СА}
К ⁽²⁾	1, 4	0,44	0,55	0,72	0,55	0,89	0,44	0,72	1,00
	2, 5	1,28	1,11	1,28	1,28	1,11	1,28	1,28	1,00
	3, 6	1,28	1,34	1,00	1,17	1,00	1,28	1,00	1,00
К ^(1,1)	1, 4	0,30	0,45	0,65	0,45	0,85	0,30	0,65	1,00
	2, 5	1,35	1,15	1,35	1,35	1,15	1,35	1,35	1,00
	3, 6	1,35	1,40	1,00	1,20	1,00	1,35	1,00	1,00
К ⁽¹⁾	1, 4	1,30	1,23	1,15	1,00	1,30	1,00	1,15	1,30
	2, 5	0,85	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	0,85
	3, 6	0,85	0,77	0,85	1,00	0,85	1,00	0,85	0,85

Примечание: за единицу принят интервал длительностью 120 эл. град.

Значения длительностей для турбогенератора ТГВ-200-2М при внешнем несимметричном КЗ приведены в табл. 5.

Выводы. Максимальная величина выпрямленного напряжения и соответственно коэффициента форсировки при всех видах КЗ достигается с МСУТ, синхронизированной по линейным напряжениям сети, вследствие того, что моменты подачи управляющих импульсов совпадают с моментами естественного включения тиристоров (см. табл. 3, 4). В то же время при этом способе управления наблюдается большая неравномерность распределения длительностей интервалов проводимости тиристоров (табл. 5), в связи с чем тиристоры в некоторых плечах преобразователя работают на интервалах, превышающих 120 эл. град. на 28–35 %. Это может вызвать существенный перегрев тиристоров.

Более эффективным было бы применение нескольких способов управления с автоматическим выбором оптимального способа и переходом с одного на другой в зависимости от длительности форсировки напряжения и вида несимметричного КЗ. Применение такого подхода невозможно реализовать в системах управления, выполненных на прежней элементной базе без применения микропроцессоров. Программная реализации

логики работы СУТ на основе цифровых микроконтроллеров позволяет расширить ее функциональные возможности в сторону повышения эффективности работы системы самовозбуждения в различных режимах работы синхронного генератора в частности при форсировании близких несимметричных коротких замыканий.

Таким образом, становится возможной разработка гибридных алгоритмов управления для МПС СУТ, использующих несколько принципов управления.

Литература

1. ГОСТ 21558-2000. Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2000.
2. Глебов, И.А. Системы возбуждения мощных синхронных машин / И.А. Глебов. – Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1979. – 313 с.
3. Писарев, А.Л. Управление тиристорными преобразователями (системы импульсно-фазового управления) / А.Л. Писарев, Л.П. Деткин. – М.: Энергия, 1975. – 264 с.
4. Глебов, И.А. Электромагнитные процессы систем возбуждения синхронных машин / И.А. Глебов. – Л.: Наука, 1987. – 344 с.

Поступила в редакцию 25.02.2008 г.

Гольдштейн Михаил Ефимович, заведующий кафедрой электрических станций, сетей и систем ЮУрГУ, канд. техн. наук, профессор. Научные интересы связаны с развитием систем электроэнергетики с силовыми полупроводниковыми преобразователями.

Goldstein Michael Efimovich. Head of the Electric Power Stations, Networks and Systems department of South Ural State University, Chelyabinsk. Scientific interests: power electronic systems, development of synchronous generator excitation systems, and engineering education.

Горшков Константин Евгеньевич, аспирант кафедры электрических станций, сетей и систем ЮУрГУ. Окончил ЮУрГУ в 2006 г. по специальности «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

Gorshkov Konstantin Evgenievich. Graduated from South Ural State University in the field of study "Relay protection and automation of electrical power systems". Post-graduate student of the Electric Power Stations, Networks and Systems department of South Ural State University. Scientific interests: modeling and simulation of power electronics systems, synchronous generator excitation systems, transition processes.