

ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЖДУ ТИРИСТОРАМИ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ СИСТЕМЫ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ВНЕШНИХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

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

CURRENT DISTRIBUTION BETWEEN THYRISTORS IN RECTIFIER OF SYNCHRONOUS GENERATOR EXCITATION SYSTEM AT EXTERNAL ASYMMETRIC SHORT CIRCUITS IN POWER SYSTEM

М.Е. Goldstein, К.Е. Gorshkov
Chelyabinsk, SUSU

Анализ электромагнитных процессов в режиме форсировки синхронного генератора при внешних несимметричных коротких замыканиях (КЗ) в энергосистеме показал неравномерное распределение токов тиристоров. Рассмотрены условия выравнивания интервалов проводимости тиристоров при разных способах синхронного фазового управления тиристорным преобразователем.

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

The analysis of electromagnetic processes in the mode of forcing of synchronous generator at external asymmetric short circuits in power system showed the non-uniform distribution of thyristors current. The conditions of leveling the intervals of conductivity of thyristors at different ways of synchronous phase control over thyristor rectifier are considered.

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

Сегодня широкое применение нашли синхронные генераторы (СГ) с системами тиристорного самовозбуждения (СТС). В такой системе величины напряжения и тока ротора зависят от напряжений на выводах статорной обмотки генератора. При внешних КЗ в энергосистеме напряжение на выводах СГ снижается, что приводит к ухудшению условий работы системы самовозбуждения (ССВ). В работах [1, 2] показано влияние вида и удаленности КЗ на коэффициент форсировки по напряжению на начальном этапе форсировки, а также на распределение длительностей работы тиристоров в установившемся режиме.

Неравномерность длительностей работы тиристоров вызвана несимметрией напряжений сети, питающей тиристорный преобразователь (ТП). В зависимости от вида несимметричного КЗ и группы соединения обмоток трансформатора системы самовозбуждения (ТСВ) тиристоры в некоторых плечах преобразователя могут работать с интервалами проводимости (ИПТ), превышающими 120 эл. град на 14–34 % [3].

На рис. 1 представлена зависимость температуры нагрева тиристоров от величины ИПТ при внешнем несимметричном КЗ для генератора ТГВ-200-2М (тиристоры Т353-800-32 с водяным

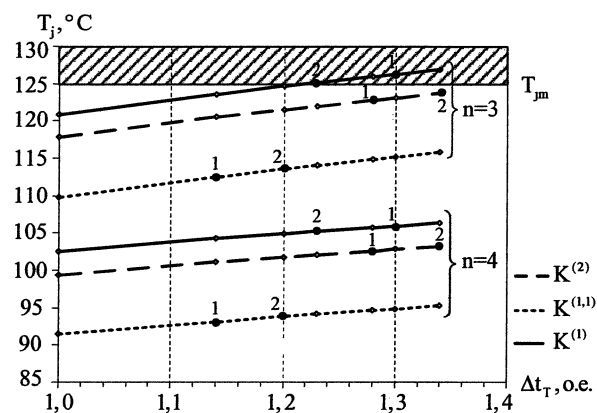


Рис. 1. Зависимость предельной температуры тиристора преобразователя ССВ ТГВ-200-2М от величины ИПТ в режиме форсировки при КЗ

охлаждением, $T_{\text{охл}} = 45^\circ\text{C}$, $t_\Phi = 20\text{ с}$). Кривые соответствуют плечу с наиболее нагруженными тиристорами. Рассматривались варианты с штатным числом параллельных тириستоров в плече ТП ($n = 4$) и при выходе из строя одной из ветвей ($n = 3$). Точки 1 и 2 соответствуют КЗ на вводах обмотки ВН блочного трансформатора для схем соединения обмоток ТСВ Y/Y и Y/D (D/Y) соответственно.

Из графиков видно, что небаланс токов, вызванный несимметрией питающих напряжений, может оказывать влияние на работу СТС в предельных режимах. Проблема возможной перегрузки тиристоров не затрагивает начальный этап форсировки, когда током возбуждения еще не достигнуто двойное номинальное значение. В установившемся режиме форсировки перегрузка тиристоров может привести к необходимости снижения тока возбуждения и, следовательно, сокращению времени форсировки.

В качестве одного из подходов решения данной проблемы предлагается совместное применение разных способов управления тиристорами, обеспечивающих наибольшее напряжение на обмотке возбуждения на начальном этапе форсировки и выравнивание ИПТ в установившемся режиме. Реализация такого подхода стала возможна с появлением микропроцессорных систем управления тиристорами (МПС СУТ).

Для управления ТП ССВ используются одноканальные или многоканальные системы синхронного фазового управления (ОСУТ, МСУТ). Особенностью синхронной СУТ является отсчет подачи импульсов управления от определенной точки напряжения питающей сети [4]. В связи с этим от выбора напряжения синхронизации зависит величина выпрямленного напряжения, а также равномерность распределения ИПТ. Добиться выравнивания ИПТ можно и при несимметричном управлении преобразователем за счет пофазной коррективки углов управления тиристорами. Ниже рассмотрены условия выравнивания ИПТ при симметричном и несимметричном синхронном управлении тиристорами в зависимости от вида и удаленности КЗ.

Расчет величин и фаз питающих напряжений ТП ССВ при разных группах соединения обмоток ТСВ. В работе [1] анализ питающих напряжений выполнен для трансформатора ССВ со схемой соединения обмоток Y/Y-12. В ССВ отечественных и зарубежных производителей применяются трансформаторы с разными группами соединения обмоток. Поэтому выполним анализ напряжений на выводах обмотки НН ТСВ в обобщенной форме для произвольной группы соединения обмоток.

На рис. 2 изображена эквивалентная схема замещения прямой последовательности СГ для начального момента времени при разных видах КЗ (n). Схема и группа соединения обмоток ТСВ

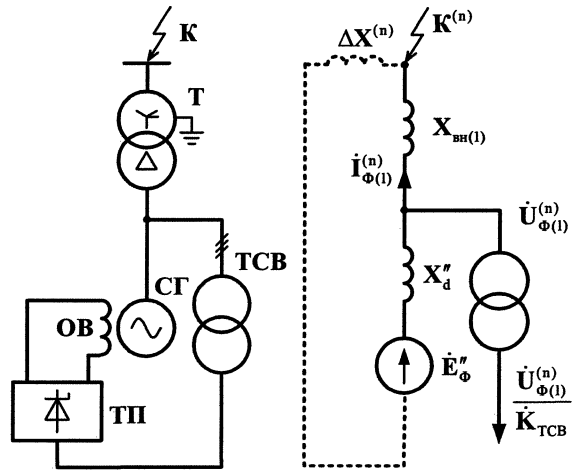


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения прямой последовательности синхронного генератора с СТС при внешнем несимметричном КЗ

учтены в виде комплексного коэффициента транс-

формации $\dot{K}_{\text{ТСВ}} = K_{\text{ТСВ}} \cdot e^{\pm jN \cdot \frac{\pi}{6}}$, где N – группа соединения обмоток 1, 2, ..., 12(0).

Величины и углы фазных напряжений на вводах ТП при внешнем двухфазном КЗ между фазами А и В и однофазном КЗ фазы С можно выразить следующим образом:

$$\begin{cases} |\dot{U}_\Phi| = \frac{|\dot{E}_\Phi''|}{K_{\text{ТСВ}}} \times \\ \times \frac{\sqrt{(x_{\text{ВН}}^{(n)} - k^{(n)} \cdot x_2)^2 + 4 \cdot x_{\text{ВН}}^{(n)} \cdot k^{(n)} \cdot x_2 \cdot \sin^2(\alpha_\Phi)}}{x_d'' + x_{\text{ВН}}^{(n)}}, (1) \\ \varphi_\Phi = \beta_\Phi - \arctg \left(\frac{x_{\text{ВН}}^{(n)} + k^{(n)} \cdot x_2}{x_{\text{ВН}}^{(n)} - k^{(n)} \cdot x_2} \cdot \tg(\alpha_\Phi) \right) + \psi, \end{cases}$$

$$\text{где } k^{(n)} = \begin{cases} 0, & \text{для } K^{(3)}, \\ -1, & \text{для } K^{(2)}, \\ -\frac{x_{\text{ВН}}^{(n)} - x_{\text{ВН}(1)}}{x_2 + x_{\text{ВН}(1)}}, & \text{для } K^{(1,1)}, \\ +1, & \text{для } K^{(1)}. \end{cases}$$

$$\alpha_\Phi = \begin{cases} (\pm N - 9) \cdot \frac{\pi}{6}, & \text{для } U_A, \\ (\pm N - 5) \cdot \frac{\pi}{6}, & \text{для } U_B, \\ (\pm N - 1) \cdot \frac{\pi}{6}, & \text{для } U_C. \end{cases}$$

$$\beta_\Phi = \begin{cases} 0, & \text{при } -\frac{\pi}{2} \leq \alpha_\Phi \leq \frac{\pi}{2}, \\ \pi, & \text{при } \frac{\pi}{2} < \alpha_\Phi < \frac{3\pi}{2}. \end{cases}$$

Здесь синхронный генератор описан сверхпереходными ЭДС $\dot{E}_\Phi'' = |\dot{E}''| \cdot e^{j\psi}$ и сопротивлением x_d'' , а также сопротивлением обратной последовательности x_2 . Сумма эквивалентного сопротивления прямой последовательности внешней цепи $x_{\text{вн}}^{(1)}$ и добавочного сопротивления в точке КЗ $\Delta x^{(n)}$ обозначена как $x_{\text{вн}}^{(n)}$. Углы α_Φ и β_Φ – величины, учитывающие группу соединения обмоток ТСВ, в выражениях запись $+N$ соответствует схемам обмоток Y/Y, D/D и Y/D, а запись $-N$ соответствует D/Y. Так как обмотки блочного трансформатора со стороны генератора соединены в треугольник, то формулы справедливы для ТСВ с заземленной и изолированной нейтралью.

На рис. 3 приведены диаграммы питающих напряжений ТП (в долях от фазного номинального напряжения обмотки НН ТСВ) для генератора ТГВ-200-2М при разных видах КЗ за блочным трансформатором ТДЦ-250000/110/15,75. Каждая диаграмма включает в себя двенадцать векторов, соответствующих четырем независимым группам соединения обмоток. Следует отметить, что систему из двенадцати векторов при близком КЗ нельзя описать единой эллиптической кривой. В результате величина выпрямленного напряжения на обмотке возбуждения СГ различается для схем соединения обмоток ТСВ Y/Y (D/D) и Y/D (D/Y) на 1–3 %, а предельная длительность работы тиристоров на 4–6 % в зависимости от вида КЗ [3].

В установившемся режиме форсировки сопротивление статорных обмоток СГ увеличивается до x_d , а ЭДС соответствует двойному номиналь-

ному значению тока возбуждения, углы фазных напряжений ТСВ при этом не меняются.

Выравнивание ИПТ при симметричном синхронном управлении тиристорами. Различают СУТ с синхронизацией по линейным и фазным напряжениям питающей сети. В МСУТ с синхронизацией по линейным напряжениям при угле управления $\alpha_y = 0$ моменты подачи управляющих импульсов совпадают с моментами естественного включения тиристоров. Для МСУТ с синхронизацией по фазным напряжениям и ОСУТ наблюдаются углы запаздывания включения тиристоров ϵ [2]. Появление углов запаздывания приводит к перераспределению длительностей работы ключей.

Формулы для расчета значений ϵ сведены в табл. 1. Интервалы запаздывания выражены через углы $A(\alpha_\Phi)$ и $B(\alpha_\Phi)$, характеризующие несимметрию питающих напряжений ТП (рис. 4):

$$A(\alpha_\Phi) = \arctg \left| \left(\frac{x_{\text{вн}}^{(n)} - k^{(n)} \cdot x_2}{x_{\text{вн}}^{(n)} + k^{(n)} \cdot x_2} \cdot \tg(\alpha_\Phi - \frac{\pi}{3}) \right)^{\pm 1} \right|, \quad (2)$$

$$B(\alpha_\Phi) = \arctg \left| \left(\frac{x_{\text{вн}}^{(n)} + k^{(n)} \cdot x_2}{x_{\text{вн}}^{(n)} - k^{(n)} \cdot x_2} \cdot \tg(\alpha_\Phi \pm \frac{2\pi}{3}) \right)^{\pm 1} \right|. \quad (3)$$

Угол α_Φ зависит от группы соединения обмоток и рассчитывается согласно табл. 2 по формулам из выражения (1). Для ТСВ со схемами соединения обмоток Y/D и D/Y выражения (2) и (3) необходимо использовать с отрицательным знаком, в остальных случаях – с положительным.

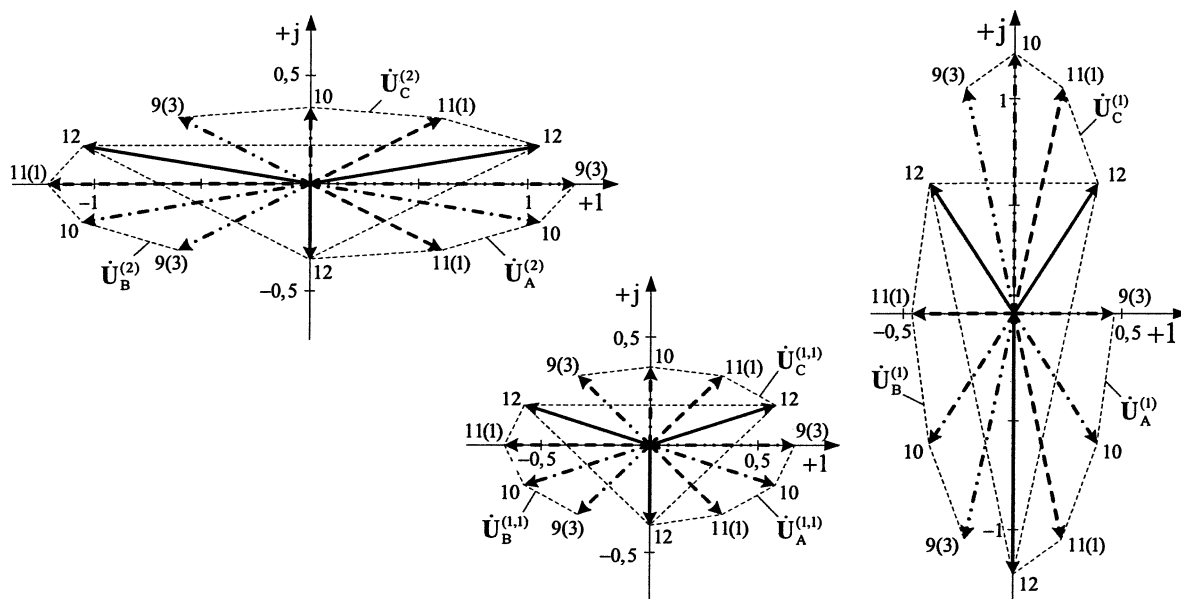


Рис. 3. Векторные диаграммы напряжений на вводах ТП ССВ ТГВ-200-2М при двухфазном (2), двухфазном на землю (1,1) и однофазном (1) КЗ за блочным трансформатором (группы соединения, указанные в скобках соответствуют ТСВ D/Y)

Таблица 1

Уравнения углов запаздывания включения тиристорov для разных групп соединения обмоток ТСВ при внешнем несимметричном КЗ

Угол, рад	Схема и группа ТСВ				Способ управления							
	Y/Y, D/D	6, 12	2, 8	4, 10	МСУТ		ОСУТ					
	Y/D	3, 9	5, 11	1, 7								
	D/Y	9, 3	7, 1	11, 5	U _Ф	U _Л	U _{A(B, C)}	U _{B(C, A)}	U _{C(A, B)}	U _{AB(BC, CA)}	U _{BC(CA, AB)}	U _{CA(AB, BC)}
ε	ε ₁	ε _{1,4}	ε _{3,6}	ε _{2,5}	$\frac{\pi}{6} - A$	0	$\frac{\pi}{6} - A$	B - A	$\frac{\pi}{3} - A - B$	$\frac{\pi}{3} - 2A$	$\frac{\pi}{6} - A$	0
	ε ₁₋₁	ε _{2,5}	ε _{1,4}	ε _{3,6}	$\frac{\pi}{6} - B$		0	$B - \frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{6} - B$	$\frac{\pi}{6} - A$	0	$A - \frac{\pi}{6}$
	ε ₁₊₁	ε _{3,6}	ε _{2,5}	ε _{1,4}	$A + B - \frac{\pi}{3}$		$A - \frac{\pi}{6}$	$A + B - \frac{\pi}{3}$	A - B	0	$A - \frac{\pi}{6}$	$2A - \frac{\pi}{3}$

Примечание. Индекс напряжений синхронизации зависит от номера столбца, в который занесена рассматриваемая группа соединения обмоток ТСВ.

Таблица 2

Значения углов для разных ТСВ

Угол	Схема и группа ТСВ			
	Y/Y, D/D	6, 12	2, 8	4, 10
	Y/D	3, 9	5, 11	1, 7
	D/Y	9, 3	7, 1	11, 5
α_Φ	α_1	α_A	α_B	α_C

Интервалы проводимости тиристорov без учета длительностей коммутаций:

$$\begin{cases} \Delta t_1 = \pi - 2A(\alpha_\Phi) + \varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i, \\ \Delta t_{i-1} = \frac{\pi}{2} + A(\alpha_\Phi) + \varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}, \\ \Delta t_{i+1} = \frac{\pi}{2} + A(\alpha_\Phi) + \varepsilon_{i-1} - \varepsilon_{i+1}. \end{cases} \quad (4)$$

В выражении (4) порядок чередования индексов углов запаздывания и ИПТ в зависимости от группы соединения обмоток ТСВ аналогичен табл. 1.

Запишем условие равенства ИПТ:

$$\Delta t_1 = \Delta t_{i-1} = \Delta t_{i+1} = \frac{2\pi}{3}, \text{ откуда}$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i = 2A(\alpha_\Phi) - \frac{\pi}{3}, \\ \varepsilon_i - \varepsilon_{i-1} = \varepsilon_{i-1} - \varepsilon_{i+1} = \frac{\pi}{6} + A(\alpha_\Phi). \end{cases} \quad (5)$$

Согласно формулам табл. 1 данное условие справедливо для ОСУТ с синхронизацией по фазным и линейным напряжениям. Но в действительности не все указанные способы обеспечивают выравнивание ИПТ во всем диапазоне угла управления, так как некоторые углы ε могут быть отрицательными, т.е. являться углами преждевременной подачи управляющих импульсов [2]. В этом случае тиристоры будут включаться только

при появлении на них положительной разности напряжений.

Определим условия, при которых углы запаздывания могут принимать отрицательные значения. При симметрии питающих напряжений, например при трехфазном КЗ, углы $A(\alpha_\Phi)$ и $B(\alpha_\Phi)$

равны друг другу и величине $\frac{\pi}{6}$. В случае несим-

метричного КЗ значения углов изменяются в зависимости от вида КЗ, его удаленности и схемы соединения обмоток ТСВ. Из сравнения диаграмм рис. 3 и кривых рис. 4 видно, что при двухфазном и двухфазном на землю КЗ справедливы соотношения:

$$\begin{cases} \frac{\pi}{6} - A(\alpha_\Phi) < 0 \\ B(\alpha_\Phi) - \frac{\pi}{6} < 0 \end{cases} \quad \text{для Y/Y и D/D,} \quad (6)$$

$$\begin{cases} A(\alpha_\Phi) - \frac{\pi}{6} < 0 \\ \frac{\pi}{6} - B(\alpha_\Phi) < 0 \end{cases} \quad \text{для Y/D и D/Y.} \quad (7)$$

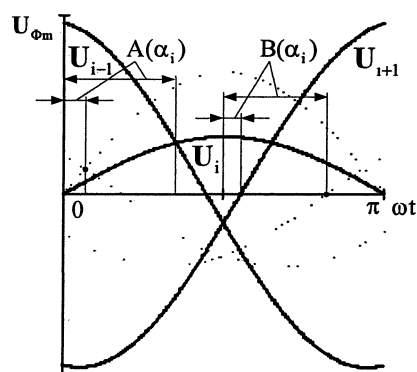


Рис. 4. Кривые питающих напряжений ТП в несимметричных режимах

При однофазном КЗ условия в (6) и (7) необходимо поменять местами. Для выявления способов синхронизации, обеспечивающих выравнивание ИПТ независимо от величины угла управления тиристорами, достаточно учесть приведенные ограничения. Результат представлен в табл. 3.

Таблица 3
Напряжения синхронизации ОСУТ, обеспечивающие выравнивание ИПТ

Вид КЗ	Схема ТСВ	
	Y/Y, D/D	Y/D, D/Y
$K^{(2)}, K^{(1,1)}$	$U_{CA} (AB, BC)$	$U_{AB} (BC, CA), U_B (C, A)$
$K^{(1)}$	$U_{AB} (BC, CA), U_B (C, A)$	$U_{CA} (AB, BC)$

Примечание. Индексация аналогична табл. 1.

Для исследования ОСУТ с синхронизацией по напряжениям $U_{B(C,A)}$ и $U_{C(A,B)}$ выражений (6), (7) недостаточно, но условия выполнения соот-

ношений $\varepsilon_{i+1} \geq 0$ и $\varepsilon_i \geq 0$ можно свести к записи:

$$\left(|x_{вн}^{(n)} - k^{(n)} \cdot x_2| - |x_{вн}^{(n)} + k^{(n)} \cdot x_2| \right)^2 \geq 0, \text{ для } U_{B(C,A)},$$

$$\left(|x_{вн}^{(n)} - k^{(n)} \cdot x_2| - |x_{вн}^{(n)} + k^{(n)} \cdot x_2| \right)^2 \leq 0, \text{ для } U_{C(A,B)}.$$

Отсюда следует, что синхронизация по напряжению $U_{C(A,B)}$ не позволяет выравнивать ИПТ при $\alpha_y = 0$. На рис. 5 изображены кривые напряжений анодной и катодной групп тиристоров ТС с ТСВ Y/D-11 для генератора ТГВ-200-2М при двухфазном и однофазном КЗ за блочным трансформатором.

Выравнивание ИПТ при остальных способах синхронизации возможно при условии, что угол управления тиристорами компенсирует углы преждевременной подачи импульсов управления $\Delta\alpha_y = \max(\varepsilon_i, \varepsilon_{i+1}, \varepsilon_{i-1})$ (рис. 6). В табл. 4 приведены минимальные значения углов управления

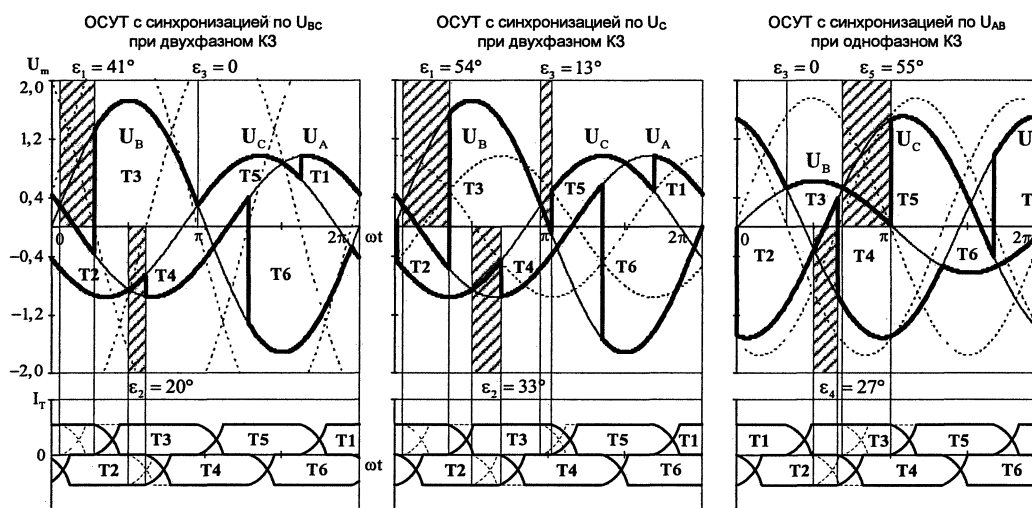


Рис. 5. Напряжения на элементах ТСГ генератора ТГВ-200-2М в режиме форсировки при нулевом угле управления (ТСВ Y/D-11)

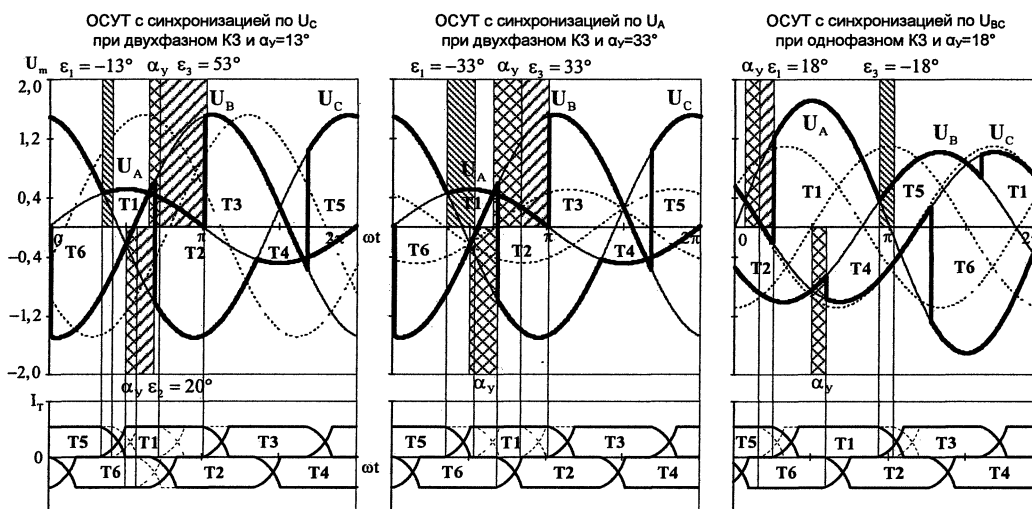


Рис. 6. Напряжения на элементах ТСГ генератора ТГВ-200-2М в режиме форсировки при ненулевом угле управления (ТСВ Y/Y-12)

тиристорами для СТС генератора ТГВ-200-2М с ТСВ У/У-12, при которых наблюдается выравнивание ИПТ.

Таблица 4
Минимальные углы управления ОСУТ, обеспечивающие выравнивание ИПТ при ТСВ У/У-12

Вид КЗ	Напряжение синхронизации					
	U _A	U _B	U _C	U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}
K ⁽²⁾	33	54	13	67	33	0
K ^(1,1)	16	29	4	32	16	0
K ⁽¹⁾	18	0	45	0	18	36

Примечание. Значения углов даны в эл. град.

Выравнивание ИПТ при несимметричном синхронном управлении тиристорами. Несимметричное пофазное управление позволяет формировать разные углы включения тиристорov в зависимости от фазы преобразователя, в которой они расположены. Запишем выражения для углов управления:

$$\begin{cases} \alpha_{y1,4} = \Delta\alpha_{yA} + \alpha_y, \\ \alpha_{y2,5} = \Delta\alpha_{yC} + \alpha_y, \\ \alpha_{y3,6} = \Delta\alpha_{yB} + \alpha_y. \end{cases} \quad (8)$$

В формуле (8) угол управления тиристором складывается из свободной составляющей α_y и дополнительной задержки i -й фазы $\Delta\alpha_{yi}$, обеспечивающей выравнивание ИПТ.

Интервалы проводимости тиристорov без учета длительностей коммутаций:

$$\begin{cases} \Delta t_1 = \pi - 2A(\alpha_\Phi) + \alpha_{yi+1} - \alpha_{yi}, \\ \Delta t_{i-1} = \frac{\pi}{2} + A(\alpha_\Phi) + \alpha_{yi} - \alpha_{yi-1}, \\ \Delta t_{i+1} = \frac{\pi}{2} + A(\alpha_\Phi) + \alpha_{yi-1} - \alpha_{yi+1}. \end{cases} \quad (9)$$

Запишем условие равенства ИПТ:

$$\begin{cases} \Delta\alpha_{yi+1} - \Delta\alpha_{yi} = 2A(\alpha_\Phi) - \frac{\pi}{3}, \\ \Delta\alpha_{yi} - \Delta\alpha_{yi-1} = \Delta\alpha_{yi-1} - \Delta\alpha_{yi+1} = \frac{\pi}{6} + A(\alpha_\Phi). \end{cases} \quad (10)$$

Для расчета величин дополнительных задержек в соответствии с выражением (10) необходимо задаться значением для одного из углов. Из рис. 4 видно, что условием выравнивания ИПТ при КЗ и минимальных значениях $\Delta\alpha_y$ будет равенство нулю $\Delta\alpha_{yi}$ (или $\Delta\alpha_{yi+1}$ для кривых, изображенных пунктирной линией). Формулы для расчета величин дополнительных задержек сведены в табл. 5.

Таблица 5
Расчет величин дополнительных задержек включения тиристорov, обеспечивающих выравнивание ИПТ

Вид КЗ	Группа ТСВ	Угол		
		$\Delta\alpha_{yA}$	$\Delta\alpha_{yB}$	$\Delta\alpha_{yC}$
K ⁽²⁾ , K ^(1,1)	2, 8	γ	0	2γ
	4, 10	2γ	γ	0
	6, 12	0	2γ	γ
	3, 9 (9, 3)	0	γ	2γ
	1, 7 (11, 5)	2γ	0	γ
	5, 11 (7, 1)	γ	2γ	0
K ⁽¹⁾	2, 8	$-\gamma$	-2γ	0
	4, 10	0	$-\gamma$	-2γ
	6, 12	-2γ	0	$-\gamma$
	3, 9 (9, 3)	-2γ	$-\gamma$	0
	1, 7 (11, 5)	0	-2γ	$-\gamma$
	5, 11 (7, 1)	$-\gamma$	0	-2γ

Примечание. $\gamma = A_m - \frac{\pi}{6}$.

Из сравнения табл. 1 и 5 видно, что углы дополнительной задержки при несимметричном управлении совпадают с углами запаздывания включения тиристорov при симметричном управлении и соответствуют ОСУТ с синхронизацией по линейным напряжениям.

Выводы

Из приведенных выше исследований можно заключить, что выравнивание длительностей работы тиристорov в длительном режиме форсировки возможно при разных способах управления ТП. Условия выравнивания зависят как от вида и удаленности несимметричного КЗ, так и от величины угла управления в установившемся режиме. Все способы можно разделить на три категории: симметричное управление с выравниванием ИПТ при $\alpha_y \geq 0$, затем при $\alpha_y \geq \Delta\alpha_y$ и выравнивание ИПТ при несимметричном управлении тиристорами. Применение каждого из подходов в МПС СУТ сводится к реализации соответствующего математического алгоритма, в связи с чем выбор того или иного подхода зависит только от особенностей текущего режима работы генератора. Результаты исследований могут быть использованы при разработке гибридных алгоритмов управления для МПС СУТ, использующих несколько принципов управления.

Литература

1. Глебов, И.А. Электромагнитные процессы систем возбуждения синхронных машин / И.А. Глебов. – Л.: Наука, 1987. – 344 с.
2. Гольдштейн, М.Е. Исследование работы системы самовозбуждения синхронного генератора при внешних несимметричных коротких за-

мыканиях / М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2008. – Вып. 10. – №26(126). – С. 36–41.

3. Гольдштейн, М.Е. Влияние группы соединения обмоток трансформатора системы самовозбуждения синхронного генератора на ее работу при несимметричных коротких замыканиях в энергосистеме / М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков //

Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: труды Международной научно-технической конференции 12–15 мая. – Тольятти: ТГУ, 2009. – Ч. 1.

4. Писарев, А.Л. Управление тиристорными преобразователями (системы импульсно-фазового управления) / А.Л. Писарев, Л.П. Деткин. – М.: Энергия, 1975. – 264 с.

Поступила в редакцию 12.01.2009 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.

Контактный телефон: 8-(351) 267-92-46.

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, engineering education.

Contact phone: 8-(351) 267-92-46.

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

Контактный телефон: 8-(351) 267-92-41.

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.

Contact phone: 8-(351) 267-92-41.