

ОЦЕНКА КРАТНОСТИ ФОРСИРОВКИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ТИРИСТОРНОЙ СИСТЕМОЙ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ РАЗГРУЗКЕ ПЛЕЧА ИЛИ МОСТА В СЛУЧАЕ ОТКАЗА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЕТВЕЙ

К.Е. Горшков

В вентильных системах самовозбуждения (ССВ) синхронных генераторов (СГ) применяются сильноточные тиристорные преобразователи (ТП), обычно выполненные по трехфазной мостовой схеме с несколькими параллельными ветвями в плечах. Надежность таких преобразователей обеспечивается установкой резервной ветви в каждом плече, что позволяет выполнять форсировку напряжения на выводах СГ при коротких замыканиях (КЗ) в энергосистеме как при полном числе ветвей, так и в случае отказа одного из параллельных тиристоров. Однако отказ большего числа тиристоров в одном плече приводит к снижению нагрузочной способности преобразователя, что вынуждает вводить запрет на форсировку генератором

внешних КЗ [1]. В работах [1, 2] показано, что в таких случаях, путем разгрузки по току только аварийного плеча или моста, нагрузочная способность ТП может быть восстановлена, а форсировка сохранена.

У синхронных генераторов с системами параллельного самовозбуждения ТП получает питание с вводов СГ. При КЗ в энергосистеме напряжение на выводах СГ обычно снижается, что приводит к снижению напряжения возбуждения, а, следовательно, и кратности форсировки по напряжению. В случае близких КЗ снижение кратности может привести к потере возбуждения и отключению генератора. Поэтому не следует допускать такого снижения напряжения возбуждения, разгружая преобразователь или отдельные его плечи при отказах параллельных ветвей. Для этого необходима оценка кратности форсировки по напряжению СГ при внешних КЗ генератора с учетом разгрузки преобразователя.

На рисунке приведена схема синхронного блока с системой самовозбуждения при КЗ вида n за повышающим трансформатором. В схеме вентильный преобразователь подключен к выводам СГ через трансформатор системы возбуждения (ТСВ) с N группой соединения обмоток. Запишем выражения для действующих значений питающих напряжений ТП в момент КЗ [3].

$$U_{\text{л}} = \frac{E''_{\Gamma}}{K_{\text{ТСВ}}} \frac{\sqrt{(x_{\text{ВН}}^{(n)} + k^{(n)} x_2)^2 - 4x_{\text{ВН}}^{(n)} k^{(n)} x_2 \sin^2 \alpha_{\text{л}}}}{x'_d + x_{\text{ВН}}^{(n)}}, \quad (1)$$

$$\text{где } \alpha_{\text{л}} = \begin{cases} (\mp N + 1) \frac{\pi}{6}, & \text{для } U_{\text{СВ}}; \\ (\mp N + 9) \frac{\pi}{6}, & \text{для } U_{\text{АС}}; \\ (\mp N + 5) \frac{\pi}{6}, & \text{для } U_{\text{ВА}}; \end{cases}$$

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

$$x_{\text{ВН}}^{(n)} = x_{\text{ВН}} + \Delta x^{(n)}.$$

Здесь E''_{Γ} – действующее значение сверхпереходной ЭДС генератора; x'_d , x_2 – сверхпереходное сопротивление по продольной оси и сопротивление

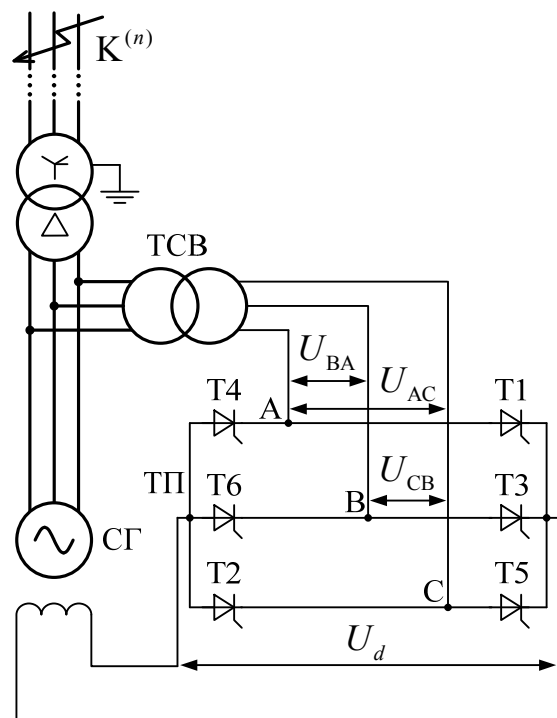


Схема синхронного блока с ССВ при КЗ в энергосистеме

обратной последовательности; $x_{\text{вн}}$ – эквивалентное сопротивление внешней схемы, отделяющей вывода СГ от точки КЗ; $\Delta x^{(n)}$ – добавочное сопротивление в точке повреждения при несимметричном КЗ; $K_{\text{ТСВ}}$ – коэффициент трансформации ТСВ. Кроме этого запись « $-N$ » соответствует схемам соединения обмоток ТСВ Y/Y , Y/Δ и Δ/Δ , а запись « $+N$ » – схеме Δ/Y .

Выпрямленное напряжение на выводах преобразователя U_d определяется его внешней характеристикой, которая при несимметричном управлении вентилями может быть представлена как

$$U_d(I_d) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \sqrt{E_A^2 + E_B^2} \cos\left(\alpha_{\text{ср}} + \arctg \frac{E_A}{E_B}\right) - \frac{3}{\pi} x_{\gamma} I_d, \quad (2)$$

$$\text{где } E_A = U_{AC} \sin \frac{\Delta\alpha_{T1} + \Delta\alpha_{T4}}{2} \cos \frac{\Delta\alpha_{T1} - \Delta\alpha_{T4}}{2} + U_{CB} \sin \frac{\Delta\alpha_{T2} + \Delta\alpha_{T5}}{2} \times \\ \times \cos \frac{\Delta\alpha_{T2} - \Delta\alpha_{T5}}{2} + U_{BA} \sin \frac{\Delta\alpha_{T3} + \Delta\alpha_{T6}}{2} \cos \frac{\Delta\alpha_{T3} - \Delta\alpha_{T6}}{2};$$

$$E_B = U_{AC} \cos \frac{\Delta\alpha_{T1} + \Delta\alpha_{T4}}{2} \cos \frac{\Delta\alpha_{T1} - \Delta\alpha_{T4}}{2} + U_{CB} \cos \frac{\Delta\alpha_{T2} + \Delta\alpha_{T5}}{2} \times \\ \times \cos \frac{\Delta\alpha_{T2} - \Delta\alpha_{T5}}{2} + U_{BA} \cos \frac{\Delta\alpha_{T3} + \Delta\alpha_{T6}}{2} \cos \frac{\Delta\alpha_{T3} - \Delta\alpha_{T6}}{2};$$

$$\alpha_{\text{ср}} = (\alpha_{T1} + \alpha_{T2} + \dots + \alpha_{T6})/6; \quad \Delta\alpha_{Ti} = \alpha_{Ti} - \alpha_{\text{ср}}, \quad i = 1 \dots 6.$$

В приведенном выражении α_{Ti} – угол задержки включения тиристорov i -го плеча; $\alpha_{\text{ср}}$ – усредненный для всех плеч угол управления преобразователем; x_{γ} – индуктивное сопротивление контуров коммутации плеч.

Полагая, что при внешних КЗ генератора тиристорный преобразователь переводится в режим форсировки практически мгновенно, запишем выражение для кратности форсировки как отношение напряжений:

$$K_U = \frac{U_d(I_d)}{U_{\text{днoм}}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{\sqrt{E_A^2 + E_B^2}}{U_{\text{днoм}}} \cos\left(\alpha_{\text{ср}} + \arctg \frac{E_A}{E_B}\right) - \frac{3}{\pi} x_{\gamma} \frac{I_d}{U_{\text{днoм}}}. \quad (3)$$

где $U_{\text{днoм}}$ – выпрямленное напряжение в номинальном режиме работы СГ.

Выразим сопротивление контуров коммутаций через параметры внешней характеристики в номинальном режиме и подставим в выражение (3):

$$\frac{3}{\pi} x_{\gamma} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_{\Gamma(\text{нoм})}}{K_{\text{ТСВ}} I_{\text{днoм}}} \cos \alpha_{\text{нoм}} - \frac{U_{\text{днoм}}}{I_{\text{днoм}}},$$

откуда

$$K_U = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{\sqrt{E_A^2 + E_B^2}}{U_{\text{днoм}}} \cos\left(\alpha_{\text{ср}} + \arctg \frac{E_A}{E_B}\right) - \\ - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_{\Gamma(\text{нoм})}}{U_{\text{днoм}} K_{\text{ТСВ}}} I_{d^*} \cos \alpha_{\text{нoм}} + I_{d^*}, \quad (4)$$

где $\alpha_{\text{ном}}$ – угол управления преобразователем в номинальном режиме;
 $I_{d^*} = I_d / I_{d\text{ном}}$ – ток ротора генератора в режиме, предшествующем КЗ.

Теперь подставим в выражение (4) приведенную ранее формулу (1), для чего выразим составляющие E_A и E_B через коэффициенты вектора отношений линейных напряжений $\mathbf{K}_л = [K_{AC} \quad K_{CB} \quad K_{BA}]$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{E_A^2 + E_B^2} = \frac{E''_{\Gamma}}{K_{\text{ТСВ}}} \frac{\sqrt{(x_{\text{ВН}}^{(n)} + k^{(n)}x_2)^2 - 4x_{\text{ВН}}^{(n)}k^{(n)}x_2 \sin^2 \alpha_m}}{x_d'' + x_{\text{ВН}}^{(n)}} \sqrt{K_{EA}^2 + K_{EB}^2}; \\ \text{arctg} \frac{E_A}{E_B} = \text{arctg} \frac{K_{EA}}{K_{EB}}, \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned} \text{где } K_{EA} &= K_{AC} \sin \frac{\Delta\alpha_{T1} + \Delta\alpha_{T4}}{2} \cos \frac{\Delta\alpha_{T1} - \Delta\alpha_{T4}}{2} + K_{CB} \sin \frac{\Delta\alpha_{T2} + \Delta\alpha_{T5}}{2} \times \\ &\times \cos \frac{\Delta\alpha_{T2} - \Delta\alpha_{T5}}{2} + K_{BA} \sin \frac{\Delta\alpha_{T3} + \Delta\alpha_{T6}}{2} \cos \frac{\Delta\alpha_{T3} - \Delta\alpha_{T6}}{2}; \\ K_{EB} &= K_{AC} \cos \frac{\Delta\alpha_{T1} + \Delta\alpha_{T4}}{2} \cos \frac{\Delta\alpha_{T1} - \Delta\alpha_{T4}}{2} + K_{CB} \cos \frac{\Delta\alpha_{T2} + \Delta\alpha_{T5}}{2} \times \\ &\times \cos \frac{\Delta\alpha_{T2} - \Delta\alpha_{T5}}{2} + K_{BA} \cos \frac{\Delta\alpha_{T3} + \Delta\alpha_{T6}}{2} \cos \frac{\Delta\alpha_{T3} - \Delta\alpha_{T6}}{2}. \end{aligned}$$

Величины α_m и $\mathbf{K}_л$ зависят от схемы и группы соединения обмоток ТСВ и могут быть найдены следующим образом:

$$\alpha_m = \begin{cases} \alpha_{CB}, \text{ при } N = 1(11), 4, 7(5), 10; \\ \alpha_{AC}, \text{ при } N = 3(9), 6, 9(3), 12; \\ \alpha_{BA}, \text{ при } N = 2, 5(7), 8, 11(1); \end{cases}$$

$$\mathbf{K}_л = \begin{cases} [K_m \quad 1 \quad K_m], \text{ при } N = 1(11), 4, 7(5), 10; \\ [1 \quad K_m \quad K_m], \text{ при } N = 3(9), 6, 9(3), 12; \\ [K_m \quad K_m \quad 1], \text{ при } N = 2, 5(7), 8, 11(1), \end{cases}$$

$$\text{где } K_m = \sqrt{\frac{(x_{\text{ВН}}^{(n)} + k^{(n)}x_2)^2 - 4x_{\text{ВН}}^{(n)}k^{(n)}x_2 \sin^2 \left(\alpha_m \pm \frac{2\pi}{3} \right)}{(x_{\text{ВН}}^{(n)} + k^{(n)}x_2)^2 - 4x_{\text{ВН}}^{(n)}k^{(n)}x_2 \sin^2 \alpha_m}} \quad - \quad \text{коэффициент}$$

амплитудной несимметрии питающих напряжений преобразователя, рассчитываемый при несимметричных КЗ. В случае трехфазного КЗ данная величина и соответственно все элементы вектора $\mathbf{K}_л$ равны единице. Группы соединения обмоток ТСВ, записанные в скобках, соответствуют схеме Δ/Y .

После подстановки полученных формул выражение (4) примет следующий вид:

$$K_U = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{E''_{\Gamma}}{U_{d\text{НОМ}} K_{\text{ТСВ}}} \frac{\sqrt{\left(x_{\text{ВН}}^{(n)} + k^{(n)} x_2\right)^2 - 4x_{\text{ВН}}^{(n)} k^{(n)} x_2 \sin^2 \alpha_m}}{x_d'' + x_{\text{ВН}}^{(n)}} \sqrt{K_{EA}^2 + K_{EB}^2} \times$$

$$\times \cos\left(\alpha_{\text{ср}} + \arctg \frac{K_{EA}}{K_{EB}}\right) - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_{\Gamma(\text{НОМ})}}{U_{d\text{НОМ}} K_{\text{ТСВ}}} I_{d*} \cos \alpha_{\text{НОМ}} + I_{d*}. \quad (5)$$

Для дальнейшего преобразования формулы (5) представим в полученном выражении ЭДС генератора в долях номинального напряжения на его выводах и выразим отношение напряжений $U_{\Gamma(\text{НОМ})} / U_{d\text{НОМ}}$ через кратность форсировки СГ в номинальном режиме $K_{U(\text{НОМ})}$:

$$\frac{U_{\Gamma(\text{НОМ})}}{U_{d\text{НОМ}}} = \frac{\pi K_{\text{ТСВ}}}{3\sqrt{2}} \left(\frac{K_{U(\text{НОМ})} - 1}{1 - \cos \alpha_{\text{НОМ}}} \right), \text{ откуда } \frac{E''_{\Gamma}}{U_{d\text{НОМ}}} = E''_{\Gamma*} \frac{\pi K_{\text{ТСВ}}}{3\sqrt{2}} \left(\frac{K_{U(\text{НОМ})} - 1}{1 - \cos \alpha_{\text{НОМ}}} \right).$$

После преобразования выражение (5) принимает окончательный вид:

$$K_U = \left(\frac{K_{U(\text{НОМ})} - 1}{1 - \cos \alpha_{\text{НОМ}}} \right) \left[E''_{\Gamma*} \frac{\sqrt{\left(x_{\text{ВН}}^{(n)} + k^{(n)} x_2\right)^2 - 4x_{\text{ВН}}^{(n)} k^{(n)} x_2 \sin^2 \alpha_m}}{x_d'' + x_{\text{ВН}}^{(n)}} \frac{\sqrt{K_{EA}^2 + K_{EB}^2}}{3} \times \right.$$

$$\left. \times \cos\left(\alpha_{\text{ср}} + \arctg \frac{K_{EA}}{K_{EB}}\right) - I_{d*} \cos \alpha_{\text{НОМ}} \right] + I_{d*} =$$

$$= \left(\frac{K_{U(\text{НОМ})} - 1}{1 - \cos \alpha_{\text{НОМ}}} \right) E''_{\Gamma*} \frac{\sqrt{\left(x_{\text{ВН}}^{(n)} + k^{(n)} x_2\right)^2 - 4x_{\text{ВН}}^{(n)} k^{(n)} x_2 \sin^2 \alpha_m}}{x_d'' + x_{\text{ВН}}^{(n)}} \frac{\sqrt{K_{EA}^2 + K_{EB}^2}}{3} \times$$

$$\times \cos\left(\alpha_{\text{ср}} + \arctg \frac{K_{EA}}{K_{EB}}\right) + \left(1 - \frac{K_{U(\text{НОМ})} - 1}{1 - \cos \alpha_{\text{НОМ}}} \cos \alpha_{\text{НОМ}} \right) I_{d*}. \quad (6)$$

Анализируя полученное выражение, можно выделить в нем четыре независимые составляющие:

$$K_U = K \times K_C K_R + C, \quad (7)$$

$$\text{где } K_C = \frac{\sqrt{\left(x_{\text{ВН}}^{(n)} + k^{(n)} x_2\right)^2 - 4x_{\text{ВН}}^{(n)} k^{(n)} x_2 \sin^2 \alpha_m}}{x_d'' + x_{\text{ВН}}^{(n)}}; \quad K = \left(\frac{K_{U(\text{НОМ})} - 1}{1 - \cos \alpha_{\text{НОМ}}} \right) E''_{\Gamma*};$$

$$K_R = \frac{\sqrt{K_{EA}^2 + K_{EB}^2}}{3} \cos\left(\alpha_{\text{ср}} + \arctg \frac{K_{EA}}{K_{EB}}\right); \quad C = \left(1 - \frac{K_{U(\text{НОМ})} - 1}{1 - \cos \alpha_{\text{НОМ}}} \cos \alpha_{\text{НОМ}} \right) I_{d*}.$$

Каждая из составляющих обуславливает зависимость K_U от определенного фактора, влияющего на работу ССВ при форсировке внешних КЗ генератором. Величина K связывает кратность форсировки с параметрами, конструкцией и предшествующим режимом работы СГ. Коэффициент K_C определяется конфигурацией и параметрами расчетной схемы сети и зависит от группы соединения обмоток ТСВ. Величина K_R зависит от схемы и режима работы преобразователя. Наконец коэффициент C связы-

ваает кратность форсировки с предшествующим замыканию режимом работы ТП.

Таким образом, зависимость кратности форсировки по напряжению СГ от соотношения углов управления плечами преобразователя определяется только величиной K_R , а от вида и удаленности короткого замыкания – произведением коэффициентов $K_C K_R$. Следовательно, полученная зависимость представляет собой семейство линейных характеристик вида $K_U(K_C K_R)$ и для оценки кратности форсировки по напряжению с ее помощью достаточно в нормальном режиме работы генератора в соответствии с величинами $E_{Г*}''$ и I_{d*} определить прямую, на которой в случае КЗ будет находиться рабочая точка начала режима форсировки, а затем, задавшись углами задержки включения тиристорных преобразователя, найти рабочую точку для рассматриваемого режима КЗ.

Библиографический список

1. Гольдштейн, М.Е. Управление возбуждением синхронных генераторов при отказах тиристорных преобразователей при коротких замыканиях в энергосистеме / М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. Всерос. науч.-техн. конф. Екатеринбург, 17–19 ноября 2010 г. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – Т. 2 – С. 103–106.

2. Гольдштейн, М.Е. Алгоритмы управления сильноточными тиристорными преобразователями систем самовозбуждения синхронных генераторов при отказах параллельных вентилях в режимах коротких замыканий / М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 14. – № 32(208). – С. 10–15.

3. Гольдштейн, М.Е. Математическая модель синхронного генератора с системой самовозбуждения в режиме форсировки при несимметричных коротких замыканиях в энергосистеме / М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2009. – Вып. 12. – № 34(167). – С. 4–11.