

## СНИЖЕНИЕ ВРЕМЕНИ АВАРИЙНОГО ГАШЕНИЯ ПОЛЯ СИНХРОННЫХ МАШИН С СИСТЕМАМИ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ

А.В. Прокудин  
г. Челябинск, ЮУрГУ

## REDUCTION OF TIME OF EMERGENCY FIELD SUPPRESSION OF SYNCHRONOUS MACHINES WITH THE SELF-EXCITATION SYSTEMS

A.V. Prokudin  
Chelyabinsk, South Ural State University

Сравниваются процессы гашения поля синхронного генератора различными способами и рассматривается устройство гашения поля с переключаемыми сопротивлениями.

*Ключевые слова:* синхронный генератор, система самовозбуждения, гашение поля на управляемых резисторах.

The processes of field suppression of a synchronous generator by different modes are compared in the article. A field suppressing device with switching resistances is analyzed.

*Keywords:* synchronous generator, self-excitation systems, field suppression on the controlled resistors.

При коротких замыканиях на выводах статора генератора требуется быстрое гашение поля синхронной машины с целью скорейшего снижения величины тока КЗ и минимизации ущерба. Системы независимого возбуждения обеспечивают достаточно быстрое гашение поля переводом преобразователя в режим инвертирования. Для систем самовозбуждения (СТС) при коротком замыкании на выводах статора режим инвертирования невозможен и недопустим в связи с появлением дополнительного тока подпитки места КЗ. Поэтому для аварийного гашения поля используют принцип рассеивания энергии обмотки ротора на стороннем объекте.

Цель выбора параметров устройства аварийного гашения поля генератора – достижение минимального времени снижения напряжения статора до уровня, при котором не поддерживается горение дугового разряда на стороне статорной обмотки генератора. В большинстве случаев этот уровень напряжения составляет 3–5 % от номинального значения напряжения статора генератора, но не более 500 В. Таким образом, задача обеспечения минимального времени гашения поля синхронной машины сворачивается к задаче обеспечения минимального времени снижения тока ротора до 3 % от значения тока ротора, соответствующего режиму холостого хода [1].

При анализе процессов аварийного гашения поля следует рассматривать случай гашения поля из наиболее тяжелого режима генератора с двукратной форсировкой по току. Согласно [1] амплитуда напряжения  $U_{f\max}$ , воздействующего на изоляцию обмотки возбуждения, не может превышать 70 % от испытательного значения, соответствующего десятикратному номинальному напряжению ротора  $10U_{fn}$ , и должно быть не менее 1500 В и не более 3500 В [2]. При исходных индуктивности  $L_f$  и активном сопротивлении  $R_f$  обмотки возбуждения процесс гашения поля описывается следующими выражениями:

$$\begin{aligned} U_{f\max} &= 10U_{fn}; \\ i_f(t) &= 2I_{fn}e^{-\frac{t}{\tau}}; \\ u_f(t) &= -10U_{fn}e^{-\frac{t}{\tau}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\tau = L_f/(R_f+R_{cc})$  – постоянная времени контура гашения поля.

С учетом того, что процесс гашения поля можно считать законченным при снижении тока возбуждения до 3–5 % от тока холостого хода, что соответствует конечному току ниже  $I_{JK} \leq 0,009I_{fn}$ , максимальное время гашения поля определяется из приведенных выше выражений (1):

$$t_{\max} = -\tau \cdot \ln \frac{I_{fK}}{2I_{fH}} = -\frac{L_f}{R_f + R_{CC}} \ln \frac{I_{fK}}{2I_{fH}}. \quad (2)$$

С учетом ограничения по амплитуде напряжения, действующего на изоляцию обмотки и составляющего  $10U_{fH}$ , максимальное время гашения на постоянном активном сопротивлении  $R_{CC}$  определяется следующим образом (2):

$$R_{CC} = 5R_f; \quad \tau_f = \frac{L_f}{R_f}; \quad (3)$$

$$t_{\max} = -\frac{L_f}{R_f + 5R_f} \ln \frac{9 \cdot 10^{-3} I_{fH}}{2I_{fH}} = 0,9\tau_f.$$

Так как в некоторых режимах постоянная времени обмотки возбуждения  $\tau_f = L_f/R_f$  может составлять несколько секунд, то процесс гашения поля существенно затягивается и это может привести к развитию аварии. Таким образом, целесообразно снижение времени гашения поля синхронной машины. Напряжение на обмотке возбуждения определяется экспоненциальным законом (1) и снижается в процессе вывода энергии из ротора. При этом скорость вывода энергии в процессе гашения также снижается:

$$\frac{dW(t)}{dt} = u_f(t) i_f(t) = -20U_{fH} I_{fH} e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Энергия, запасенная в обмотке возбуждения, прямо пропорциональна квадрату тока:

$$W = \frac{I_f^2 L_f}{2},$$

и единственным способом ускорения процесса гашения поля является увеличение или поддержание напряжения  $u_f(t)$  на уровне, максимально допустимом для изоляции. При этом скорость вывода будет меняться медленнее:

$$\frac{dW(t)}{dt} = u_f(t) i_f(t) = -20U_{fH} I_{fH} e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

В этом случае процесс гашения поля из режима форсировки описывается следующими выражениями:

$$|U_{f\max}| = 10U_{fH}; \quad (4)$$

$$u_f(t) = -10U_{fH};$$

$$i_f(t) = -\frac{U_{f\max}}{U_{fH}} I_{fH} + \left( \frac{U_{f\max}}{U_{fH}} + 2 \right) I_{fH} e^{-\frac{t}{\tau_f}} =$$

$$= I_{fH} \left[ \left( e^{-\frac{t}{\tau_f}} - 1 \right) \frac{U_{f\max}}{U_{fH}} + 2e^{-\frac{t}{\tau_f}} \right];$$

$$i_f(t) \geq I_{fK}.$$

Достижимое время снижения тока от величины  $2I_{fH}$  до допустимого конечного значения  $I_{fK}$  из выражений (4) определяется так:

$$t_{\max} = -\tau_f \cdot \ln \left( \frac{\frac{I_{fK}}{I_{fH}} + \frac{U_{f\max}}{U_{fH}}}{\frac{U_{f\max}}{U_{fH}} + 2} \right) = -\tau_f \cdot \ln \left( \frac{\frac{I_{fK}}{I_{fH}} + K_{\Gamma}}{K_{\Gamma} + 2} \right). \quad (5)$$

Здесь  $K_{\Gamma} = U_{f\max}/U_{fH} = 10$  – параметр «кратность гашения», который характеризует максимальное значение амплитуды действующего напряжения на обмотку возбуждения по отношению к номинальному значению напряжения возбуждения. При допустимом конечном значении тока возбуждения  $I_{fK} \leq 0,009I_{fH}$  минимально достижимое время гашения поля составляет  $0,18\tau_f$ . Таким образом, переход на режим гашения поля с поддержанием (стабилизацией) напряжения дает снижение времени в 5 раз. Это уже существенно и соответствует минимально достижимому времени вывода энергии из обмотки возбуждения без превышения допустимого напряжения на изоляции.

Режим гашения поля синхронных машин с поддержанием напряжения в современных системах возбуждения реализуется тремя способами: перевод тиристорного преобразователя в режим инвертирования, подключение к обмотке неуправляемого нелинейного сопротивления и подключение управляемого линейного сопротивления. В случае применения инвертирования тиристорным преобразователем кратность гашения  $K_{\Gamma}$  редко превышает значение 2,5 и минимально достижимое время гашения  $t_{\max}$  больше чем  $0,58\tau_f$  (при  $I_{fK} \leq 0,009I_{fH}$ ). Принцип гашения на нелинейном сопротивлении реализован в автоматах гашения (АГП производства АО «Силовые машины») и устройствах гашения поля на силовых варисторах. АГП содержит большое количество как подвижных, так и тепломеханически нагруженных элементов, что снижает его надежность и требует частого обслуживания. Устройства гашения с силовыми варисторами, как и АГП, приближаются к идеальному случаю гашения поля. Но они чрезвычайно дороги и их производство, как и производство АГП монополизировано. Поэтому сегодня производятся системы возбуждения с гашением поля на  $R_{CC}$ . Однако время гашения поля при этом существенно больше, чем при применении АГП или инвертирования [3].

В тиристорном устройстве гашения поля (ТУГП) [4] нелинейная вольт-амперная характеристика (ВАХ) обеспечивается ступенчатым изменением значения активного сопротивления. Идеализированная ВАХ и для АГП, и для ТУГП имеет вид

$$U(I) = \text{const} = U_{f\max}.$$

Опираясь на выражения (4), описывающие процесс гашения поля при стабилизируемом напряжении, зависимости величины рассеиваемого сопротивления  $R_{CC}$  ТУГП принимают вид:

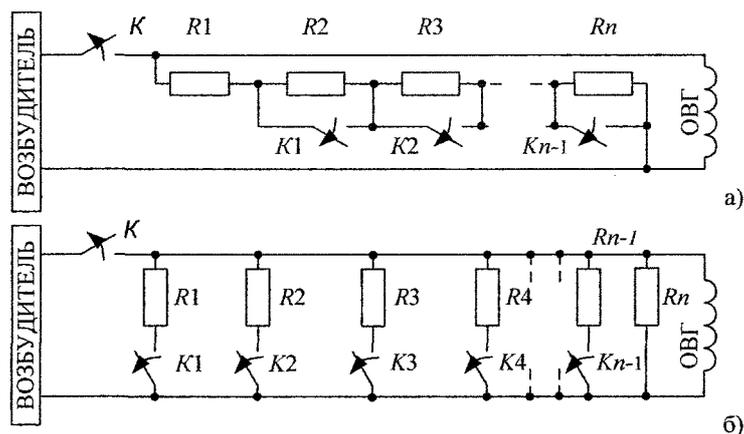


Рис. 1. Варианты исполнения схемы тиристорного УГП

$$R_{cc}(t) = \frac{K_f R_f}{(K_f + 2)e^{-t/\tau_f} - K_f} \quad (6)$$

$$R_{cc}(i_f) = \frac{K_f U_{fH}}{i_f} \quad (7)$$

Тиристорное УГП должно обеспечивать зависимости (6) и (7) и может быть построено по двум вариантам схем: с последовательным соединением (рис. 1, а) и с параллельным соединением элементарных резисторов (рис. 1, б).

При отключении ключа  $K$  (рис. 1) ток обмотки возбуждения генератора (ОВГ) переходит на резисторы  $R_1 \dots R_n$ . За счет отключения ключей  $K_1 \dots K_{n-1}$  сопротивление увеличивается ступенчато. При  $n \rightarrow \infty$  ВАХ и зависимость  $R_{cc}(t)$  стремятся к выражениям (6) и (7). Оба варианта схем работоспособны, обеспечивают требуемые характеристики, но технологичность схем разная. В частности, схема на рис. 1, б реализуется на резисторах с одинаковыми сопротивлением и мощностью, тогда как

схема на рис. 1, а требует разных по мощности резисторов. К тому же в качестве резисторов ТУГП могут использоваться резисторы, входящие в состав  $R_{cc}$ .

### Литература

1. ГОСТ 21558–2000. Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. – М.: Изд-во стандартов, 2003.
2. ГОСТ РФ 183–74. Машины электрические вращающиеся. – М.: Изд-во стандартов, 1976.
3. Гольдштейн, М.Е. Особенности гашения поля турбогенераторов с системой самовозбуждения без АГП / М.Е. Гольдштейн, А.С. Шумилов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2001. – № 4. – С. 44–48.
4. Пат. 2282925 Российская Федерация, МПК H02 H 7/12 H02P 9/14. Способ и устройство гашения магнитного поля обмотки возбуждения синхронной машины (варианты) / Е.Я. Крекер, М.Е. Гольдштейн, А.Н. Андреев. – № 2005111665/09; заявл. 19.04.05; опубл. 27.08.06, Бюл. № 27 (II ч.). – 3 с.

Поступила в редакцию 15.02.2011 г.

**Прокудин Александр Владимирович**, ведущий инженер кафедры электрических станций, сетей и систем, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76. Контактный телефон: (351) 267-92-41.

**Prokudin Aleksander** is a leasing engineer of the Electric Power Plants, Networks and Systems Department, South Ural State University, Chelyabinsk, 76 Lenin prospect. Tel: (351) 267-92-41.