УДК 621.311

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫМИ ТИРИСТОРНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ СИСТЕМ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПРИ ОТКАЗАХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЕНТИЛЕЙ В РЕЖИМАХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

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

ALGORITHMS FOR SYNCHRONOUS GENERATORS SELF-EXCITATION SYSTEMS HIGH-CURRENT THYRISTOR RECTIFIERS CONTROL AT PARALLEL GATES FAULTS IN THE POWER SYSTEM SHORT-CIRCUITS MODES

M.E. Goldstein, K.E. Gorshkov
Chelyabinsk, South Ural State University

Рассмотрены особенности работы сильноточных тиристорных преобразователей систем самовозбуждения синхронных генераторов при отказах параллельных вентилей. Показаны возможные функциональные ограничения и недостатки в их работе в случае коротких замыканий в энергосистеме. Предложены алгоритмы управления сильноточными тиристорными преобразователями, расширяющие функциональные возможности систем самовозбуждения при отказах параллельных вентилей и обеспечивающие режим форсировки при внешних коротких замыканиях генератора.

Ключевые слова: алгоритм, управление, турбогенератор, система самовозбуждения, тиристорный преобразователь, отказ, короткое замыкание (КЗ).

The article considers the features of high-current thyristor rectifiers of synchronous generators self-excitation systems at parallel gates faults. Shows the possible functional limitations and shortcomings in their work at short-circuits in the power system. The algorithms of high-current thyristor rectifiers control that extend the functionality of the self-excitation systems at the faults of parallel gates and providing the forcing mode at synchronous generator external short-circuits are proposed.

Keywords: algorithm, control, synchronous generator, self-excitation system, thyristor rectifier, gate fault, short-circuit.

Сегодня в системах самовозбуждения (ССВ) мощных турбогенераторов применяются мостовые сильноточные тиристорные преобразователи (ТП), нормируемые токи которых обеспечиваются параллельным соединением нескольких ветвей. Это соединение структурно и конструктивно реализуется либо в плечах преобразователя, либо параллельными вентильными частями, обычно выполненными по трехфазной мостовой схеме [1,2].

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к системам возбуждения синхронных генераторов (СГ), система самовозбуждения должна обеспечивать все режимы их работы, включая форсировку напряжения на выводах при коротких замыканиях (КЗ) в энергосистеме [3]. Отказ параллельных ветвей или вентильных частей сильноточного преобразователя ССВ приводит к снижению его нагрузочной способности и, как следствие, ограничению режимов работы синхронного генератора по току возбуждения. В то же время, обеспечение форсировки СГ при отказах параллельных тиристоров является необходимым условием для успешного восстановления напряжения и сохранения устойчивой работы генераторов при авариях в энергосистеме. Поэтому расчетным при выборе тиристоров в ходе проектирования системы самовозбуждения является режим форсировки генератора с одновременным отказом вентильных ветвей. При этом в зависимости от числа отказавших ветвей в одном плече ГОСТ устанавливает ограничение по току преобразователя и, следовательно, режиму работы синхронного генератора.

Тем не менее, в случае отказа нескольких параллельных ветвей в одном плече, включая все

дополнительные, вводят запрет на форсировку напряжения на выводах СГ [4, 5]. Такое решение обусловлено тем, что при снижении нагрузочной способности вентильного преобразователя наступает перегрев тиристоров током форсировки при нормируемых ГОСТом длительности и кратности форсировки по току [6, 7]. Однако в этом случае исключается и не рассматривается возможность форсирования при кратностях по току меньших нормируемой. Очевидно, что в случае допустимости таких режимов работы по условию нагрева преобразователя форсировка напряжения на выводах СГ стала бы осуществимой, а ее полный запрет излишним.

В системах самовозбуждения турбогенераторов нагрузка ТП имеет практически индуктивный характер (для турбогенераторов 200-500 МВт в режиме холостого хода $T_{d0} = 4{,}5 \ldots 7{,}5$ с), в связи с этим при отказах параллельных ветвей для разгрузки наиболее нагруженного плеча преобразователя обычно разгружают все его плечи. Однако при фазовом управлении преобразователем режимы работы его плеч задаются углами включения тиристоров, управление которыми может осуществляться по-разному [8]. При симметричном управлении вентилями для предотвращения перегрева преобразователя можно снизить кратность форсировки по напряжению и в результате ограничить ток возбуждения. При несимметричном можно перераспределить нагрузку между плечами в зависимости от нагрева их тиристоров и тем самым снизить разброс температур нагрева вентилей, оставшихся в работе при отказах параллельных ветвей, что приведет к частичному восстановлению нагрузочной способности вентильного преобразователя. В связи с этим применение разных способов управления тиристорами позволило бы расширить функциональные возможности тиристорного преобразователя и системы самовозбуждения при отказах параллельных вентилей.

Рассмотрим работу тиристорного преобразователя ССВ СГ с N основными параллельными ветвями в плечах. В соответствии с ГОСТ 215-58.2000 при работе с полным числом вентилей (обычно $N+1$), а также при выходе из строя любого числа дополнительных вентилей, преобразователь должен обеспечивать все режимы работы ССВ [3]. В случае выхода из строя двух вентилей в одном и том же плече преобразователя (N-1) должно выполняться ограничение тока ротора до значения, соответствующего номинальному режиму работы синхронного генератора с коэффициентом мощности равным единице ($P_{ном}$, $\cos\varphi = 1$) с введением запрета на форсирование напряжения на выводах СГ при авариях в энергосистеме. При работе синхронного генератора с номинальной активной мощностью и коэффициентом мощности равным единице ток ротора обычно на $30 \pm 5\%$ меньше номинального. В то же время в длительном режиме работы максимально допустимый ток преобразователя должен быть не ниже 110 % номинального тока возбуждения [3]. Следовательно, разгрузка тиристорного преобразователя по току при переводе синхронного генератора в режим работы, соответствующий $P_{ном}$ и $\cos\varphi = 1$, может составить 30-40 % от номинального тока преобразователя. Определим реальную величину разгрузки преобразователя по току, которая необходима для его работы по условию нагрева в случае отказа m из N основных параллельных ветвей в плече.

Разгрузка тиристорного преобразователя при симметричном управлении вентилями. Среднее значение тока в открытом состоянии для наиболее нагруженного тиристора трехфазной мостовой схемы с несколькими параллельными ветвями в одном плече [9]:

$$I_{T(AV)} = \frac{I_{EM}}{N \cdot K_A} K_H, \qquad (1)$$

где I_{EM} – амплитуда огибающей кривой тока плеча, K_A – коэффициент амплитуды тока, K_H – коэффициент неравномерности деления тока в плече.

Предполагая, что при некотором значении тока возбуждения $I_f < I_{fmax} = 1{,}1 \cdot I_{fном}$ нагрузка плеча с отказавшими вентилями не превышает максимально допустимую, т.е. $I_{T(AV)}(N-m) \le I_{T(AV)max}$, запишем соотношение для токов тиристоров:

$$\frac{1{,}1 \cdot I_{fном}}{N \cdot K_A} K_H = \frac{I_f}{(N-m) \cdot K_A} K'_H,$$

откуда

$$\frac{I_f}{I_{fном}} = 1{,}1 \frac{K_H}{K'_H}\left(1 - \frac{m}{N}\right). \qquad (2)$$

В данном выражении $K'_H > K_H$, так как с уменьшением числа параллельных ветвей неравномерность деления тока в плече возрастает [9]. Однако при $N - m \ge N/2$ разница между коэффициентами не значительна, а в случае применения устройств динамического распределения нагрузок в плечах практически отсутствует [10]. В связи с этим при $m \le N/2$ выражение (2) можно представить в виде:

$$I_{f*} = 1{,}1\left(1 - \frac{m}{N}\right), \qquad (3)$$

где $I_{f*} = I_f / I_{fном}$.

На рис. 1 приведены зависимости предельно допустимого тока возбуждения СГ от штатного числа параллельных ветвей в случае отказа одного, двух и трех основных вентилей в плече. Кроме того показана величина тока возбуждения I'_f, получаемая при разгрузке преобразователя по току согласно требованиям ГОСТ. Значение $I'_{f*} = 0{,}69$ соответствует режиму работы турбогенератора ТГВ-200-2М Челябинской ТЭЦ-3 при $P_{ном}$ и

$\cos\varphi = 1$. Из сравнения кривых следует, что при выходе из строя одного основного тиристора в преобразователе с $N = 3$ снижение тока возбуждения на 27 % от номинального позволяет полностью скомпенсировать рост нагрузки на оставшихся тиристорах. В случае преобразователя с $N = 4$ для этого достаточно снизить ток возбуждения всего на 18 %. В тоже время полная разгрузка СГ по реактивной мощности дает снижение тока возбуждения на 31 % и, следовательно, приводит к значительным запасам по нагреву тиристоров ТП даже в случае отказа некоторых из них. В результате для мощных ССВ с сильноточными преобразователями с $N \geq 6$ возможна работа СГ при отказе двух основных вентилей, а для $N \geq 9$ при отказе трех вентилей.

В установившемся режиме форсировки работа СГ и ССВ нормируются предельной кратностью по току возбуждения и допустимой длительностью форсировки. Для турбогенераторов кратность форсировки по току составляет $K_i = 2,0$. Соответствующая ей допустимая длительность форсировки зависит от конструкции и способа охлаждения обмоток генератора и варьируется в пределах 10...50 С. Основываясь на кривых рис. 1 определим допустимую кратность форсировки по току при сохранении нормированной длительности форсирования.

Допустимая кратность форсировки по току при условии, что ток наиболее нагруженного вентиля преобразователя не превышает максимального допустимого значения длительного режима работы, может быть найдена следующим образом:

$$K_i = 2\frac{I_{f*}}{I_{fmax*}} = 2\left(1 - \frac{m}{N}\right). \qquad (4)$$

Кривые приведены на рис. 2. Из сравнения кривых следует, что при выходе из строя всех дополнительных и одного основного вентиля в плече допустимая кратность форсировки в зависимости от мощности преобразователя лежит в пределах 1,33... 1,8. В связи с этим, можно сделать вывод, что введение запрета на форсировку в ряде случаев приводит к значительному недоиспользованию перегрузочной способности тиристорного преобразователя.

Таким образом, более эффективным будет алгоритм управления тиристорным преобразователем, учитывающий число вышедших из строя и оставшихся в работе вентилей. При таком управлении автоматический регулятор возбуждения (АРВ) должен самостоятельно рассчитывать величину ограничения режимов работы СГ по току возбуждения согласно (3) и допустимую кратность форсировки по току в соответствии с (4). И только в случае $I_{f*} < I'_{f*}$ СГ следует переводить на источник резервного возбуждения или выводить из работы.

Разгрузка тиристорного преобразователя при несимметричном управлении вентилями. Температура нагрева наиболее нагруженного тиристора зависит от интенсивности его охлаждения и обусловлена тепловыми потерями на проводящем интервале $P_{T(AV)}$, а также потерями при включении $P_{TT(AV)}$ и выключении $P_{RQ(AV)}$. Тепловые потери при коммутации вентиля $P_{TT(AV)}$ и $P_{RQ(AV)}$ не зависят от величины среднего тока в открытом состоянии. В связи с этим изменением коммутационных потерь, возникающим при перераспределении нагрузки между плечами преобразователя, можно пренебречь. В этом случае задача распределения нагрузки преобразователя по плечам сводится к определению длительностей работы плеч $\Delta t'_T$ и $\Delta t''_T$, при которых разница тепло-

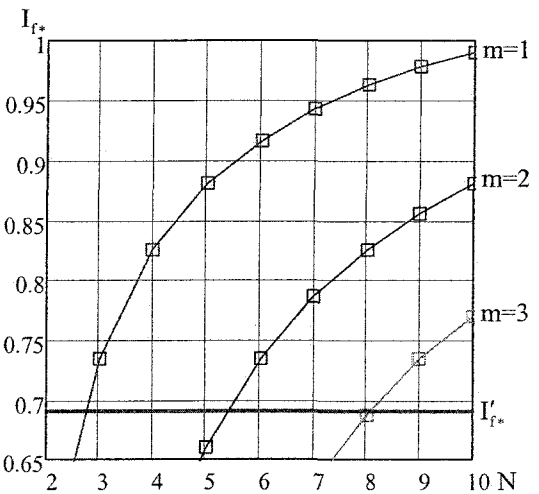

Рис. 1. Допустимый ток возбуждения СГ по условию нагрева тиристорного преобразователя ССВ при отказе m параллельных вентилей из N основных в плече

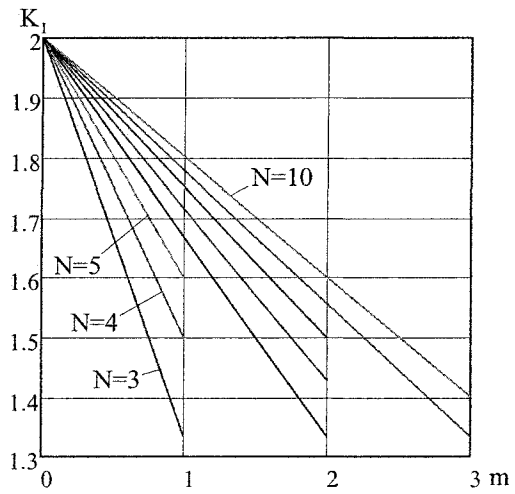

Рис. 2. Допустимая кратность форсировки по току с учетом разгрузки преобразователя в предшествующем режиме

вых потерь в тиристорах в открытом состоянии минимальна (рис. 3). Так в преобразователях, выполненных по трехфазной мостовой схеме, длительности работы плеч взаимосвязаны, то критерием оптимального распределения будет равенство между собой тепловых потерь в наиболее нагруженных тиристорах разных плеч. Получаемой при этом величине $P_{T(AV)}$ можно сопоставить тепловые потери в вентилях преобразователя при некотором эквивалентном симметричном режиме работы его плеч $P'_{T(AV)}$. В этом режиме средний ток наиболее нагруженного вентиля равен $I'_{T(AV)}$, а ток возбуждения I'_{f*}. Величина $I'_{T(AV)}$ определяется возможным диапазоном соотношений длительной работы плеч, который зависит от времени коммутации тиристоров. Наибольшее время переключения тиристоров наблюдается в режиме форсировки при этом в одногрупповых системах самовозбуждения турбогенераторов углы коммутации вентилей как правило не превышают 60 эл. град, т. е. $\gamma_* < 0{,}5$. В связи с этим возможные длительности работы плеч следует ограничивать значениями $\Delta t'_{T*} = 0{,}5 \ldots 1$ и $\Delta t''_{T*} = 1{,}25 \ldots 1$. Если при этом $I'_{f*} > I_{fmax*}$, то необходимо введение дополнительного ограничения режима работы СГ по току возбуждения, так как, не смотря на перераспределение длительностей работы плеч, будет возможен перегрев преобразователя в установившемся режиме работы и в режиме форсировки. Найдем оптимальные соотношения длительностей работы плеч и определим ограничения по току возбуждения в случае отказа m из N основных параллельных ветвей в плече.

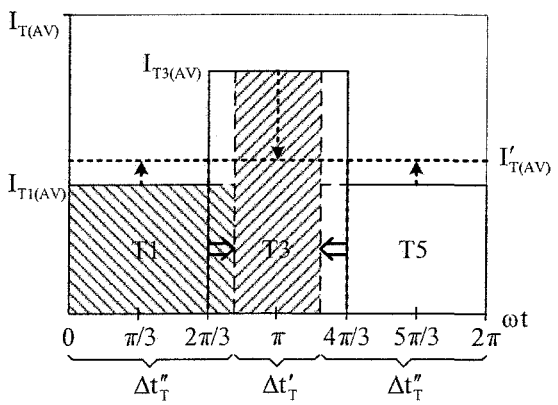

Рис. 3. К задаче поиска оптимального распределения длительностей работы плеч тиристорного преобразователя (отказ ветви в плече Т3)

Тепловые потери в вентиле в открытом состоянии при длительности проводящего интервала равной $\Delta t_T = 2\pi/3$ [9]:

$$P_{T(AV)} = U_{T(TO)} I_{T(AV)} + r_T K_\Phi^2 I_{T(AV)}^2, \qquad (5)$$

где $U_{T(TO)}$ – пороговое напряжение в открытом состоянии, r_T – динамическое сопротивление в открытом состоянии, K_Φ – коэффициент формы тока.

Для тока плеча прямоугольной формы, если $\Delta t_{T*} = 1$, то $K_A = K_\Phi^2 = 3$ [9]. Следовательно, потери за период основной частоты при произвольной длительности проводящего интервала:

$$P_{T(AV)}(m,N,\Delta t_{T*}) = P_{T(AV)}(m,N)\Delta t_{T*}. \qquad (6)$$

В соответствии с критерием распределения потерь при несимметричном управлении оптимальным будет соотношение:

$$P_{T(AV)}(m,N)\Delta t'_{T*} = P_{T(AV)}(0,N)\Delta t''_{T*} = P'_{T(AV)}(0,N).$$

Полагая, что при этом действительный ток возбуждения равен I_{f*}, а его величина в эквивалентном симметричном режиме не превышает значения максимально допустимого по условию нагрева тиристорного преобразователя $I'_{f*} \le I_{fmax*}$, выразим $\Delta t'_{T*}$ и $\Delta t''_{T*}$ относительно I_{f*}.

$$\Delta t'_{T*} = \frac{\dfrac{1{,}1 \cdot I_{fном} K_H}{3N}\left(U_{T(TO)} + r_T \dfrac{1{,}1 \cdot I_{fном} K_H}{N}\right)}{\dfrac{I_f K'_H}{3(N-m)}\left(U_{T(TO)} + r_T \dfrac{I_f K'_H}{N-m}\right)},$$

откуда

$$\Delta t'_{T*} = \frac{1{,}1}{I_{f*}}\left(1 - \frac{m}{N}\right)^2 \left(\frac{K_H}{K'_H}\right)^2 \frac{1{,}1+\Delta}{I_{f*}+\Delta'}, \qquad (7)$$

где $\Delta = \dfrac{U_{T(TO)}}{r_T}\dfrac{N}{I_{fном} K_H}$, $\Delta' = \dfrac{U_{T(TO)}}{r_T}\dfrac{N-m}{I_{fном} K'_H}$.

$$\Delta t''_{T*} = \frac{\dfrac{1{,}1 \cdot I_{fном} K_H}{3N}\left(U_{T(TO)} + r_T \dfrac{1{,}1 \cdot I_{fном} K_H}{N}\right)}{\dfrac{I_f K_H}{3N}\left(U_{T(TO)} + r_T \dfrac{I_f K_H}{N}\right)},$$

откуда

$$\Delta t''_{T*} = \frac{1{,}1}{I_{f*}} \frac{1{,}1+\Delta}{I_{f*}+\Delta}. \qquad (8)$$

Независимо от способа управления и возможного при этом соотношения длительностей работы плеч их сумма всегда равна 2π. Воспользуемся данным свойством для определения величины I_{f*}:

$$\Delta t'_{T*} + 2\Delta t''_{T*} = 3,$$

$$\frac{1{,}1}{I_{f*}}\left(1 - \frac{m}{N}\right)^2 \left(\frac{K_H}{K'_H}\right)^2 \frac{1{,}1+\Delta}{I_{f*}+\Delta'} + 2\frac{1{,}1}{I_{f*}} \frac{1{,}1+\Delta}{I_{f*}+\Delta} = 3.$$

Данное выражение легко преобразовывается к линейному уравнению третьего порядка, записанному в виде:

$$x^3 + \alpha x^2 + \beta x + \gamma = 0, \qquad (9)$$

где $\alpha = \Delta' + \Delta$,

$$\beta = \Delta' \cdot \Delta - \frac{1,1}{3}(1,1+\Delta)\left[\left(1-\frac{m}{N}\right)^2\left(\frac{K_H}{K'_H}\right)^2 + 2\right],$$

$$\gamma = -\frac{1,1}{3}(1,1+\Delta)\left[\left(1-\frac{m}{N}\right)^2\left(\frac{K_H}{K'_H}\right)^2 \cdot \Delta + 2\Delta'\right].$$

В рамках рассматриваемой задачи уравнение (9) при заранее известных значениях коэффициентов может иметь только одно допустимое решение в области действительных переменных. Это решение в аналитической форме имеет вид:

$$I_{f*} = \left(\left[\left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} - \frac{q}{2}\right)^{\frac{1}{3}} -$$

$$-\frac{p}{3}\left(\left[\left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} - \frac{q}{2}\right)^{-\frac{1}{3}} - \frac{\Delta' + \Delta}{3}, \qquad (10)$$

где $p = \Delta' \cdot \Delta - \frac{(\Delta' + \Delta)^2}{3} -$

$$-\frac{1,1}{3}(1,1+\Delta)\left[\left(1-\frac{m}{N}\right)^2\left(\frac{K_H}{K'_H}\right)^2 + 2\right],$$

$$q = -\frac{\Delta' + \Delta}{3}\left[\left(\frac{\Delta' + \Delta}{3}\right)^2 + p\right] -$$

$$-\frac{1,1}{3}(1,1+\Delta)\left[\left(1-\frac{m}{N}\right)^2\left(\frac{K_H}{K'_H}\right)^2 \cdot \Delta + 2\Delta'\right].$$

Полученное выражение позволяет найти предельную величину тока возбуждения в случае отказа m параллельных вентилей из N основных в плече. Следовательно, допустимая при таком начальном токе кратность форсировки может быть определена как:

$$K_I = 2\frac{I_{f*}}{1,1}. \qquad (И)$$

Таким образом, для предотвращения перегрева преобразователя при отказе параллельной ветви автоматический регулятор возбуждения должен самостоятельно рассчитать ограничение режима работы СГ по току возбуждения в соответствии с выражением (10) и допустимую кратность форсировки согласно выражению (11), определить новые длительности работы плеч по выражениям (7) и (8) и обеспечить формирование соответствующих углов включения тиристоров. Если в результате расчета окажется, что $\Delta t'_{T*} < 0,5$ и $\Delta t''_{T*} > 1,25$, то при данных условиях обеспечить работу ТП без перегрева нельзя. В этом случае СГ следует выводить из работы или переводить на источник резервного возбуждения.

Графики зависимостей $I_{f*}(m,N)$, $K_I(m,N)$, $\Delta t'_{T*}(m,N)$ и $\Delta t''_{T*}(m,N)$ приведены на рис. 4–6. Кривые получены в соответствии с параметрами тиристорного преобразователя ССВ блока 220 МВт Челябинской ТЭЦ-3 ($I_{fном} = 2015$ А, Т353-800-32: $U_{T(TO)} = 1,15$ В, $r_T = 0,5$ мОм, $K_H = 1,1$) при условии равенства коэффициентов $K'_H = K_H$.

Из сравнения кривых на рис. 1, 2 и рис. 4, 5, полученных при разных способах управления вентилями, следует, что в случае несимметричного управления можно обеспечить режим форсировки при значительно меньших ограничениях, чем при симметричном управлении. Однако для этого необходим более сложный алгоритм формирования углов включения тиристоров. Так как в современных системах самовозбуждения применятся микропроцессорные системы управления, возможности которых практические не ограничены, то реализация

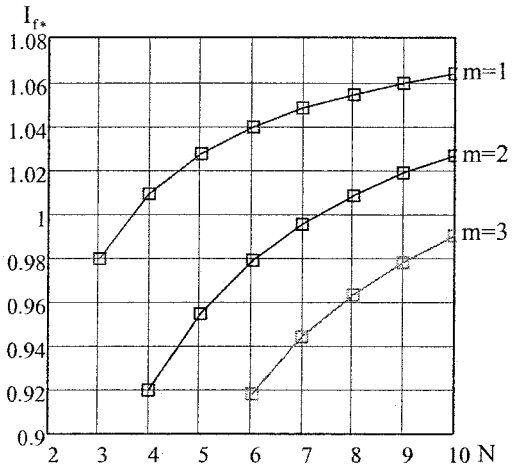

Рис. 4. Допустимый ток возбуждения СГ по условию нагрева тиристорного преобразователя ССВ при несимметричном управлении вентилями

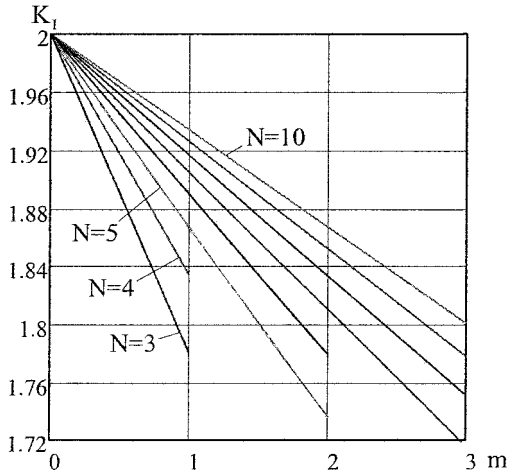

Рис. 5. Допустимая кратность форсировки по току с учетом разгрузки преобразователя в предшествующем режиме при несимметричном управлении вентилями

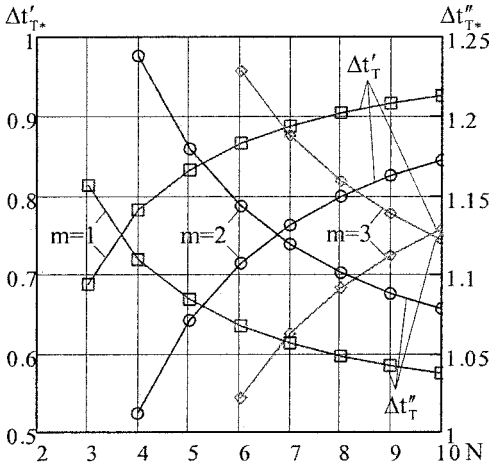

Рис. 6. Распределение длительностей работы плеч преобразователя при несимметричном управлении вентилями

такого алгоритма управления и аналогичных ему становится доступной.

Выводы

1. Выявлено, что общепринятая методика предотвращения перегрева сильноточных тиристорных преобразователей ССВ турбогенераторов при отказах параллельных вентилей в ряде случаев приводит к необоснованному полному запрету форсировки напряжения на выводах СГ.

2. Путем оценки действительного снижения нагрузочной способности ТП при отказах параллельных ветвей получены выражения для определения требуемых ограничений по току возбуждения СГ в установившемся режиме и в режиме форсировки в случае применения симметричного и не симметричного способов управления вентилями.

3. На основе полученных выражений, предложены алгоритмы управления сильноточным преобразователем ССВ, расширяющие функциональные возможности систем самовозбуждения при отказах параллельных вентилей и обеспечивающие режим форсировки при авариях в энергосистеме.

Литература

1. Глебов, И.А. Развитие систем возбуждения и регулирования турбо- и гидрогенераторов / И.А. Глебов // Известия РАН. Энергетика. — 1996. -№4.-С 47-63.

2. Логинов, А.Г. Системы возбуждения турбо- и гидрогенераторов ОАО «Электросила» / А.Г. Логинов // Электротехника. — 2003. —№5.—С. 43—48.

3. ГОСТ 21558-2000. Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. Общие технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 2000.

4. СО 34.45.629-2002. Методические указания по техническому обслуживанию микропроцессорных АРВ и систем управления силовых преобразователей систем возбуждения генераторов. — М.: СПО ОРГРЭС, 2003.

5. Логинов, А.Г. Микропроцессорный автоматический регулятор типа АРВ-М для систем возбуждения АО «Электросила» / А.Г. Логинов, А.В. Фадеев // Электротехника. - 2001. - № 9. — С. 66-70.

6. Горшков, К.Е. Перегрев тиристоров преобразователя системы самовозбуждения синхронного генератора при внешних несимметричных коротких замыканиях / К.Е. Горшков // Научный поиск: материалы 1 научной конференции аспирантов и докторантов. Секция технических наук. Челябинск, 27-30 апреля 2009 г. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. - С. 246-250.

7. Горшков, К.Е. Управление тиристорным преобразователем системы самовозбуждения синхронного генератора в режиме форсировки как средство повышения надежности работы энергосистемы /К.Е. Горшков //Современные техника и технологии: сб. тр. XVI Международной науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 12-16 апреля 2010г.: в 3-х т. — Томск: Изд-во ТПУ, 2010. -Т.1.- С. 30-32.

8. Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники: учеб. пособие / Г. С Зиновьев. - 3-е изд., испр. и доп. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. -672 с.

9. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках / М.И. Абрамович, В.М. Бабайлов, В.Е. Либер и др. —М.: Энергоатомиздат, 1992. - 432 с.

10. Логинов, А.Г. Разработка и исследование устройства автоматического управления нагрузками тиристоров параллельно соединенных выпрямителей систем возбуждения: дис. ... канд. техн. наук/А.Г. Логинов. - СПб.: СПбГПУ, 2006. - 209 с.

Поступила в редакцию 10.09.2010 г.

Гольдштейн Михаил Ефимович, канд. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электрических станций, сетей и систем, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. 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, and engineering education.

Горшков Константин Евгеньевич, аспирант кафедры электрических станций, сетей и систем, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

Gorshkov Konstantin Evgenievich. 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 proceses.