

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИНХРОННОМ ГЕНЕРАТОРЕ ПРИ АКТИВНОМ ХАРАКТЕРЕ НАГРУЗКИ

Ю. И. РЯБЧИКОВ, Г. А. СИПАЙЛОВ, А. В. ЛООС

Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники

Исследованию переходных процессов в синхронной машине посвящено большое количество работ, опубликованных как у нас в стране, так и за рубежом. Тем не менее некоторые специфические явления, имеющие место в переходных режимах синхронных машин, к настоящему времени еще не получили должного освещения [1]. Так, к явлениям, по ряду причин не нашедшим достаточно полного отражения в теории переходных режимов синхронных машин, могут быть отнесены некоторые процессы, имеющие место при внезапном включении синхронного генератора на нагрузку активного характера. Частично это объясняется тем, что основное внимание уделено аварийным режимам, а точнее, самому тяжелому из них — процессу внезапного короткого замыкания на зажимах генератора. В этом случае активное сопротивление цепи статора настолько мало по сравнению со сверхпереходным и переходным сопротивлением генератора, что не оказывает сколь-нибудь существенного влияния на величины максимальных всплесков токов [2, 3]. Переходной процесс в основном определяется параметрами генератора по продольной оси d , а влияние параметров по поперечной оси q сводится лишь к нахождению составляющих токов двойной частоты, обусловленных электромагнитной несимметрией индуктора.

Существуют, однако, и другие важные случаи, для которых предположение равенства нулю активного сопротивления цепей якоря не может быть принято, например внезапное подключение к синхронному генератору неподвижного асинхронного двигателя, определение внезапного изменения напряжения, вызванного подключением нагрузочного сопротивления с любым коэффициентом мощности и др.

Известно, что при наличии конечного активного сопротивления в цепи якоря ось результирующего магнитного потока в воздушном зазоре не совпадает ни с продольной, ни с поперечной осью ротора генератора, но может быть разложена на две составляющие, совпадающие с ними. Изменение тока в одном из контуров ротора вызывает изменение обеих составляющих магнитного потока, а значит приводит к изменению потокосцеплений всех контуров. Таким образом, несмотря на то, что контуры ротора по продольной и поперечной осям сдвинуты друг относительно друга на 90 электрических градусов, они оказываются электромагнитно связанными.

Для оценки влияния параметров каждого контура на переходный процесс используем уравнения Парка-Горева. В целях уменьшения громоздкости математических выкладок будем считать, что в продольной

и поперечной осях ротора имеется лишь по одному контуру. При необходимости наличие двух контуров в продольной оси можно учесть в соответствии с [5].

Для этого случая система уравнений равновесия напряжений генератора при работе на активную нагрузку принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_d}{dt} &= -\omega\Psi_q - Ri_d; \\ \frac{d\Psi_q}{dt} &= \omega\Psi_d - Ri_q; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{d\Psi_f}{dt} = U_f - r_f i_f;$$

$$\frac{d\Psi_{Dq}}{dt} = -r_{Dq} i_{Dq},$$

где

$$\begin{aligned} \Psi_d &= L_d i_d + L_{ad} i_f; \\ \Psi_q &= L_q i_q + L_{aq} i_{Dq}; \\ \Psi_f &= L_f i_f + L_{ad} i_d; \\ \Psi_{Dq} &= L_{Dq} i_{Dq} + L_{aq} i_q; \\ R &= r_s + R_H. \end{aligned} \quad (2)$$

Если включению генератора на нагрузку предшествовал режим холостого хода, системе (1) соответствуют начальные значения потокоцеплений:

$$\Psi_{d0} = L_{ad} i_{f0}, \quad \Psi_{f0} = L_f i_{f0}, \quad \Psi_{q0} = \Psi_{Dq0} = 0. \quad (3)$$

Поскольку формальное решение системы достаточно громоздко и осложнено необходимостью отыскания корней алгебраического уравнения четвертого порядка, дадим приближенное решение задачи, заключающееся в пренебрежении трансформаторными э. д. с. в уравнениях равновесия напряжения контуров статора, т. е. положим

$$\frac{d\Psi_d}{dt} = 0; \quad \frac{d\Psi_q}{dt} = 0. \quad (4)$$

Погрешность такого допущения главным образом сводится к тому, что в решении не будут учтены апериодические составляющие фазных токов статора и обусловленные ими члены [6].

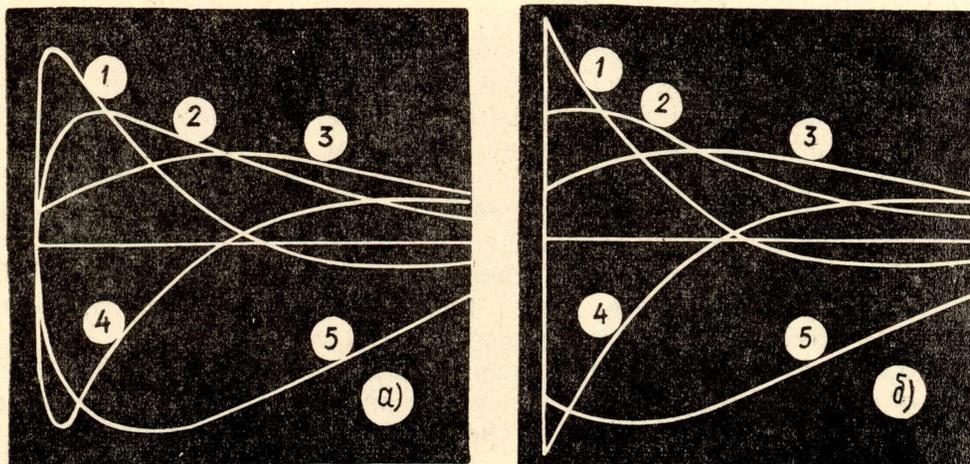


Рис. 1 а, б. 1 — i_q , 2 — i_{da} , 3 — i_f , 4 — i_{Dq} , 5 — i_d

На рис. 1 (а и б) приведены решения переходного процесса, вызванного внезапным включением генератора на активную нагрузку по уравнениям, соответственно учитывающим (а) и не учитывающим (б) наличие трансформаторных э. д. с. в обмотке якоря. Решения получены методом математического моделирования дифференциальных уравнений на аналоговой вычислительной машине ЭМУ-10 и соответствуют следующим параметрам:

$$\begin{aligned} L_{ad} = L_{aq} = 1; \quad L_d = L_q = 1,05; \quad L_f = 1,2; \\ L_{Dd} = L_{Dq} = 1,03; \quad r_f = r_{Dd} = r_{Dq} = 0,02; \\ R = 0,1; \quad \omega = 1. \end{aligned}$$

Все параметры даны в относительных единицах.

Из сравнения рисунков видно, что сделанное во втором случае упрощение не привело к значительной погрешности в решении, что объясняется сравнительно малым значением постоянной времени цепи якоря при активной нагрузке.

С учетом (4) получение аналитического решения значительно облегчается. Применяв преобразования Лапласа, находим изображения токов в операторной форме при начальных условиях (3). Имеем

$$I_d(p) = \frac{N_1(p)}{M(p)}; \quad (5)$$

$$I_q(p) = \frac{N_2(p)}{M(p)},$$

где

$$N_1 = -\omega^2 L_{ad}(pL_{Dq}L'_q + L_q r_{Dq})(p\Psi_{f0} + U_f); \quad (6)$$

$$N_2 = R\omega L_{ad}(pL_{Dq} + r_{Dq})(p\Psi_{f0} + U_f); \quad (7)$$

$$\begin{aligned} M = p\{p^2 L_f L_{Dq}(R^2 + \omega^2 L'_d L'_q) + p[L_f r_{Dq}(R^2 + \omega^2 L'_d L_q) + \\ + L_{Dq} r_f(R^2 + \omega^2 L_d L'_q)] + r_f r_{Dq}(R^2 + \omega^2 L_d L_q)\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Осуществив переход к оригиналам, получим

$$i_d = \sum_{k=1}^3 \frac{N_1(p_k)}{M'(p_k)} e^{p_k t}; \quad (9)$$

$$i_q = \sum_{k=1}^3 \frac{N_2(p_k)}{M'(p_k)} e^{p_k t}, \quad (10)$$

где p — корни многочлена (8),

M' — производная многочлена (8) по параметру p .

С помощью полученного решения можно рассчитать изменение токов, потокосцеплений, напряжения в течение переходного процесса, однако произвести анализ влияния отдельных параметров на характер переходного процесса непосредственно по формулам (6—10) без построения соответствующих кривых оказывается весьма затруднительно ввиду громоздкости выражений для корней многочлена (8). С этой целью предварительно исследуем следующие предельные случаи:

1) обмотки контуров ротора сверхпроводящие ($r_f = r_{Dq} = 0$, $U_f = 0$);
2) обмотка возбуждения имеет конечное активное сопротивление, демпферная обмотка по оси q разомкнута ($r_{Dq} = \infty$);

3) обмотка возбуждения сверхпроводящая ($r_f = 0$, $U_f = 0$), демпферная обмотка по оси q имеет конечное сопротивление. Следует отметить, что полагая контуры ротора сверхпроводящими, мы находим начальные значения всплесков токов, которые могут быть также определены подстановкой в (9, 10) $t=0$. После преобразований имеем

$$i_{d(0)} = - \frac{x_{ad} i_{f0} x'_{q'}}{R^2 + x'_{d'} x'_{q'}} ;$$

$$i_{q(0)} = \frac{R x_{ad} i_{f0}}{R^2 + x'_{d'} x'_{q'}} . \quad (11)$$

Амплитудное значение фазного тока

$$I_{m\phi(0)} = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} = \frac{E_{m\phi 0} \sqrt{(x'_{q'})^2 + R^2}}{R^2 + x'_{d'} x'_{q'}} , \quad (12)$$

где $E_{m\phi 0} = x_{ad} i_{f0}$ — амплитуда фазного напряжения холостого хода.

Исследования влияния параметров генератора на величину всплесков токов, проведенные в [7], показывают, что начальное значение амплитуды фазного тока, как функция параметра $x'_{q'}$, имеет минимум при $x'_{q'} = x'_{d'}$, увеличение или уменьшение $x'_{q'}$ при сохранении остальных параметров неизменными приводит к увеличению $I_{m\phi(0)}$. Дополнительно исследуем внезапное изменение величины магнитного потока в зазоре и изменение напряжения на зажимах генератора после включения активной нагрузки. Выражение для определения величины магнитного потока в зазоре, полученное на основании уравнений (2, 3) с учетом (12), и выражение для определения начального значения амплитуды фазного напряжения имеют вид

$$\Phi_0 = \frac{E_{m\phi 0} \sqrt{R^2 + (x'_{q'})^2}}{\omega (R^2 + x'_{d'} x'_{q'})} \sqrt{R^2 + x_s^2} , \quad (13)$$

$$U_{m\phi(0)} = \frac{E_{m\phi 0} \sqrt{R^2 + (x'_{q'})^2}}{R^2 + x'_{d'} x'_{q'}} R . \quad (14)$$

Представляет интерес исследовать (13) и (14) на экстремум по параметру R . Проведя это, найдем, что обе функции имеют по одному максимуму соответственно при

$$R_1 = \sqrt{\frac{x'_{q'} [x'_{d'} (x'_{q'})^2 - 2x'_{q'} x_s^2 + x'_{d'} x_s^2]}{(x'_{q'})^2 - 2x'_{d'} x'_{q'} + x_s^2}} ; \quad (15)$$

$$R_2 = \sqrt{\frac{x'_{d'} (x'_{q'})^2}{x'_{q'} - 2x'_{d'}}} . \quad (16)$$

Следовательно, если параметры генератора таковы, что выражения (15, 16) дают действительные значения, то существует определенный интервал изменения величины активной нагрузки, включение на которую должно привести к увеличению магнитного потока в воздушном зазоре и напряжения на зажимах генератора по сравнению с холостым ходом. Необходимо отметить, что это возможно лишь при электромагнитной несимметрии ротора, в противном случае величины, определяемые формулами (15, 16), выражаются комплексными числами (нетрудно видеть, например, что для того, чтобы величина, определяемая по (16), имела действительное значение, необходимо выполнение условия $x'_{q'} > 2x'_{d'}$). Как показывают исследования, наибольшее увеличение потока в зазоре, как и амплитуды напряжения генератора, будет при предельной несимметрии, например, полном отсутствии демпферной обмотки по поперечной оси шихтованного ротора.

Отмеченные эффекты легко могут быть объяснены на основе общепринятой теории двух реакций [4]. Действительно, после включения активной нагрузки величину магнитного потока в воздушном зазоре можно определить по ее составляющим Φ_{ad} и Φ_{aq} :

$$\Phi_0 = \sqrt{\Phi_{ad}^2 + \Phi_{aq}^2} . \quad (17)$$

Для простоты предположим, что обмотки ротора сверхпроводящие и не создают потоков рассеяния. Тогда, в случае электромагнитной симметрии ротора, величина магнитного потока по сравнению с потоком холостого хода не изменится ($\Phi_{ad} = \Phi_{ado}$, $\Phi_{aq} = 0$). При отсутствии же демпферной обмотки по поперечной оси составляющая Φ_{ad} останется без изменений, однако составляющая Φ_{aq} в случае активного характера нагрузки уже не будет равна нулю. В результате величина потока, определяемого по (17), окажется большей, чем до включения нагрузки. Увеличение магнитного потока в зазоре, в свою очередь, вызывает возрастание э. д. с. вращения в обмотке якоря, что может привести к повышению напряжения на зажимах генератора.

Как отмечалось, изменения величин токов, потокосцеплений и связанных с ними значений э. д. с. вращения могут происходить в реальной машине только за конечное время. Приводимые же формулы не отражают этого, что является следствием пренебрежения при их выводе трансформаторными э. д. с. Кроме этого, так как обмотки ротора реального генератора обладают конечными активными сопротивлениями, одновременно имеют место два процесса: процесс изменения токов, потокосцеплений и связанных с ними величин, в соответствии с постоянной времени цепи якоря, и процесс затухания этих величин, определяемый постоянными времени контуров ротора в переходном режиме. В результате существование повышенного напряжения и потока в зазоре генератора после его включения на нагрузку может быть лишь кратковременным, а формулы (13, 14) дают несколько завышенные значения.

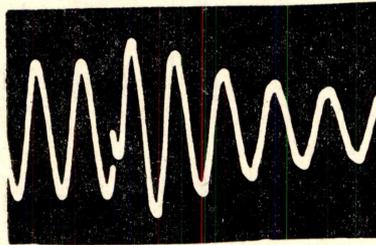


Рис. 2

На рис. 2 представлена экспериментальная осциллограмма линейного напряжения при внезапном включении генератора на симметричную активную нагрузку для случая, когда демпферная обмотка по поперечной оси разомкнута. Генератор выполнен в габаритах асинхронного двигателя АК-51-4. Параметры генератора и нагрузки: $x_{ad} = x_{aq} = 1,1$; $x'_d = 0,15$; $R = 0,4$. Магнитная цепь генератора не насыщена. На осциллограмме хорошо виден эффект увеличения напряжения непосредственно после включения генератора на нагрузку, что подтверждает правильность сделанных теоретических выводов. Отметим еще одну особенность переходного процесса в синхронном генераторе при внезапном его включении на активную нагрузку. Является общепринятым тот факт, что затухание переходных токов в контурах ротора приводит к постепенному уменьшению величины амплитуды фазного тока. В этой связи представляет интерес рассмотрение случая, когда демпферная обмотка по оси q имеет конечное активное сопротивление, а сопротивление обмотки возбуждения равно нулю. При этом условия выражения для токов, полученные на основе (6—10), могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned} i_d &= i_{d2} - (i_{d2} - i_{d1})e^{pt}; \\ i_q &= i_{q2} - (i_{q2} - i_{q1})e^{pt}, \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$p = - \frac{r_{Dq}}{L_{Dq}} \frac{R^2 + x'_d x'_q}{R^2 + x'_d x'_q} ; \quad (19)$$

i_{d1}, i_{q1} — начальные всплески соответствующих токов, определяемые по (11) для случая замкнутой демпферной обмотки по оси q ;

i_{d2}, i_{q2} — соответственно для случая разомкнутой демпферной обмотки по оси q .

Формулы (18—19) выражают экспоненциальный закон изменения во времени токов i_d, i_q от значений, равных начальным всплескам соответствующих токов при замкнутой демпферной обмотке по оси q , до значений, равных начальным всплескам токов, если демпферная обмотка по поперечной оси была бы разомкнута. Так как начальное значение амплитуды фазного тока, определяемое по (12), оказывается во втором случае большей [7], можно заключить, что затухание переходного тока в демпферной обмотке по оси q при сверхпроводящих контурах в продольной оси ротора приводит к постепенному возрастанию периодического тока статора. То же относится к изменению величин потока в зазоре и амплитуды напряжения на зажимах генератора.

Рассмотренный случай, так же как и случай сверхпроводящих контуров ротора, является идеализированным. Тем не менее, если постоянная времени обмотки ротора по продольной оси много больше постоянной времени демпферной обмотки по поперечной оси, некоторое время после включения такого генератора на активную нагрузку может наблюдаться нарастание амплитуды тока и напряжения, после него наступает спад этих величин до установившихся значений.

Таким образом, проделанные исследования показывают, что по сравнению с процессом внезапного короткого замыкания или включения на индуктивную нагрузку переходный процесс при внезапном включении синхронного генератора на симметричную активную нагрузку имеет ряд существенных отличий. Последние проявляются в особом влиянии электромагнитной несимметрии ротора на величины начальных всплесков токов, на внезапное изменение магнитного потока в зазоре, на изменение напряжения на зажимах генератора, на характер процесса, связанного с затуханием переходных токов в контурах ротора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Я. Казовский. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. М.-Л., Изд-во АН СССР, 1962.
2. А. И. Важнов. Электрические машины. Л. «Энергия», 1969.
3. Н. П. Ковач, И. Рац. Переходные процессы в машинах переменного тока. М.-Л., Госэнергоиздат, 1963.
4. М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. Электрические машины. Ч. 2, Л., «Энергия», 1973.
5. Л. Г. Мамиконянц. О переходных процессах в синхронных машинах с успокоительными контурами на роторе. «Электричество», 1954, № 7.
6. М. И. Алябьев. Общая теория судовых электрических машин. Л., Изд-во «Судостроение», 1965.
7. Ю. И. Рябчиков, Г. А. Сипайлов, А. В. Лоос. О влиянии электромагнитной несимметрии ротора на величину тока нагрузки импульсного машинно-вентильного генератора. Известия ТПИ, т. 284, 1973.