

## О ФОРСИРОВКЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Г. А. СИПАЙЛОВ, А. И. ВЕРХОТУРОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Форсировка возбуждения находит широкое применение как в синхронных машинах нормального исполнения для повышения устойчивости параллельной работы, особенно при аварийных режимах, так и в специальных электрических машинах, в частности, в генераторах разрывной мощности для поддержания напряжения при коротком замыкании, длительность которого составляет примерно 10—20 периодов э.д.с. В генераторах ударной мощности, рабочий процесс которых длится около одного периода э.д.с., не имеет смысла осуществлять форсировку подобного рода, так как при наличии мощной демпферной обмотки на роторе практически не удастся повлиять на величину напряжения за столь короткий промежуток времени.

При работе генератора ударной мощности в режиме, когда длительность пауз между одиночными импульсами тока превосходит суммарную постоянную времени обмоток ротора, становится целесообразным прерывистое возбуждение с форсированным нарастанием магнитного потока до требуемой величины перед каждым включением генератора. При этом, исходя из условия допустимой тепловой нагрузки ротора, э.д.с. генератора может достигать значительно больших величин по сравнению с тем случаем, когда возбуждение осуществляется непрерывно.

Мощность ударного генератора в максимальных киловольтampe-рах  $P_m$  может быть выражена через номинальную габаритную мощность  $P_n$  [1].

$$P_m = \frac{4k_\phi^2 \cdot k_z^2}{x_d''} P_n,$$

где  $k_\phi$  — коэффициент форсировки напряжения,

$k_z$  — коэффициент затухания тока статора,

$x_d''$  — сверхпереходное индуктивное сопротивление в относительных единицах.

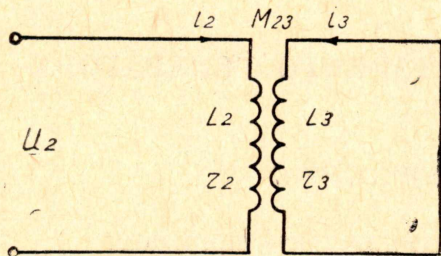
При прерывистом форсированном возбуждении можно получить коэффициент  $k_\phi$  равным 1,2 и более, что позволяет увеличить максимальную мощность ударного генератора примерно в 1,5 раза. При этом увеличение мощности происходит как за счет повышения напряжения, так и в некоторой степени за счет уменьшения сверхпереходного индуктивного сопротивления из-за насыщения магнитной цепи.

Ударные генераторы имеют более высокие потери холостого хода по сравнению с турбогенераторами такой же габаритной мощности. Это обусловлено большей насыщенностью участков магнитной цепи



ударных генераторов, а также и тем, что из-за уменьшенного воздушного зазора большой удельный вес приобретают добавочные потери. Основную часть потерь холостого хода ударного генератора составляют потери в стали, которые при непрерывном, а также и при прерывистом возбуждении без форсировки превышают в 5—8 и более раз потери в меди обмотки возбуждения.

Применение форсировки при прерывистом возбуждении оказывает существенное влияние как на величину, так и на распределение потерь



Р и с. 1. Схема обмоток ротора ударного генератора.

в меди и стали. Чтобы определить коэффициент форсировки возбуждения  $k$ , при котором для заданной частоты повторения импульсов потери будут минимальными, необходимо установить связь между ними и исследовать влияние форсировки на величину потерь в меди и стали.

Для установления указанных зависимостей рассмотрим переходный процесс включения обмотки возбуждения ударного генератора (рис. 1) на постоянное напряжение  $u_2$

$$\begin{cases} u_2 = i_2 \cdot r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} \\ 0 = i_3 \cdot r_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{23} \frac{di_2}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

где  $r_2, L_2$  — параметры обмотки возбуждения,  
 $r_3, L_3$  — параметры демпферной обмотки,  
 $M_{23}$  — взаимная индуктивность обмоток ротора.

Решая систему уравнений (2), находим выражения для токов:

$$i_2 = \frac{u_2}{r_2} + \frac{u_2}{bL_2} \left[ \left( 1 + \frac{\sigma p_2}{\delta_2} \right) e^{p_1 t} - \left( 1 + \frac{\sigma p_1}{\delta_2} \right) e^{p_2 t} \right] \quad (3)$$

$$i_3 = - \frac{u_2 M_{23}}{bL_2 L_3} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}), \quad (4)$$

где  $\delta_2 = \frac{r_2}{L_2}$  — коэффициент затухания обмотки возбуждения,

$\delta_3 = \frac{r_3}{L_3}$  — коэффициент затухания демпферного контура,

$\sigma = 1 - k_c^2$  — коэффициент рассеяния контуров,

$k_c = \frac{M_{23}}{\sqrt{L_2 \cdot L_3}}$  — коэффициент связи,

$p_{1,2} = \frac{1}{2\sigma} [-(\delta_2 + \delta_3) \pm b]$  — корни характеристического уравнения,

$$b = \sqrt{(\delta_2 - \delta_3)^2 + 4k_c^2 \delta_2 \delta_3}$$

Поток, создающий напряжение на обмотке статора генератора, пропорционален сумме токов  $i_2$  и  $i_3$  и коэффициенту взаимной индукции между роторной и статорной обмотками  $M_{12}$ :

$$\psi = \psi_0 \left\{ 1 + \frac{\delta_2}{b} \left[ \left( 1 + \frac{\sigma p_2}{\delta_2} - \frac{M_{23}}{L_3} \right) e^{p_1 t} - \left( 1 + \frac{\sigma p_1}{\delta_2} - \frac{M_{23}}{L_3} \right) e^{p_2 t} \right] \right\}. \quad (5)$$



В общем виде уравнение (5) невозможно решить относительно времени, однако, оно существенно упрощается, если допустить, что коэффициент рассеяния обмоток равен нулю:

$$\psi = \psi_0 \left( 1 - Ae^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (6)$$

где

$$A = \frac{1}{\delta_2 + \delta_3} \left( \delta_3 + \frac{r_2}{\sqrt{L_2 L_3}} \right),$$

$T = T_2 + T_3$  — суммарная постоянная времени контуров ротора.

Если без форсировки возбуждения поток нарастает до номинального значения за время  $t$ , то при форсировке в  $k$  раз поток нарастает до такого же значения за более короткое время  $t_1$ . Отсюда отношение потоков равно:

$$\frac{k \left( 1 - Ae^{-\frac{t_1}{T}} \right)}{1 - Ae^{-\frac{t}{T}}} = 1. \quad (7)$$

Можно считать, что без форсировки возбуждения поток достигает установившегося значения за время  $t = \infty$ . Тогда, используя (7), получим

$$t_1 = T \ln \frac{kA}{k-1}. \quad (8)$$

Выражение (8) имеет смысл только для  $k > 1$ . Потери в стали ударного генератора при постоянной частоте пропорциональны квадрату потока. Тогда потери энергии в стали генератора за время  $t_1$  при форсировке и соответственно за время  $t$  (без форсировки) можно представить:

$$Q_{c1} = Nk^2\psi_0^2 \int_0^{t_1} \left( 1 - 2Ae^{-\frac{t}{T}} + A^2e^{-\frac{2t}{T}} \right) dt, \quad (9)$$

$$Q_c = N\psi_0^2 \int_0^t \left( 1 - 2Ae^{-\frac{t}{T}} + A^2e^{-\frac{2t}{T}} \right) dt, \quad (10)$$

где  $N$  — величина, зависящая от материала, степени насыщения и частоты.

Обозначим  $k_{fc} = \frac{Q_{c1}}{Q_c}$ , тогда после интегрирования (9) и (10)

$$k_{fc} = \frac{k^2 \left\{ t_1 + AT \left[ 2e^{-\frac{t_1}{T}} - 0,5 A \left( e^{-\frac{2t_1}{T}} - 1 \right) - 2 \right] \right\}}{t + AT \left[ 2e^{-\frac{t}{T}} - 0,5 A \left( e^{-\frac{2t}{T}} - 1 \right) - 2 \right]}. \quad (11)$$

Считая, что переходный процесс заканчивается за время  $t = 3T$  и подставляя в (11) значение  $t$ , из (8) получим



$$k_{\text{фс}} = \frac{k^2 \left\{ -\ln \left( \frac{k-1+0,0498 A}{kA} \right) + A \left[ 2e^{\ln \left( \frac{k-1+0,0498 A}{kA} \right)} - \right. \right.}{3 + A(0,5A - 1,9)} \\ \left. \left. - 0,5A \left( e^{2\ln \left( \frac{k-1+0,0498 A}{kA} \right)} - 1 \right) - 2 \right] \right\}}{3 + A(0,5A - 1,9)} \quad (12)$$

Обозначив по аналогии с предыдущим через  $k_{\text{фмв}}$  отношение энергии потерь в меди обмотки возбуждения при форсировке  $Q_{\text{мв1}}$  к энергии без форсировки  $Q_{\text{мв}}$ , получим

$$k_{\text{фмв}} = \frac{k^2 \left\{ t_1 + BT \left[ 2 \left( e^{-\frac{t_1}{T}} - 1 \right) - 0,5B \left( e^{-\frac{2t_1}{T}} - 1 \right) \right] \right\}}{t + BT \left[ 2 \left( e^{-\frac{t}{T}} - 1 \right) - 0,5B \left( e^{-\frac{2t}{T}} - 1 \right) \right]}, \quad (13)$$

$$B = \frac{T_2}{T}$$

Аналогично для демпферной обмотки

$$k_{\text{фмд}} = \frac{k^2 \left( e^{-\frac{2t_1}{T}} - 1 \right)}{e^{-\frac{2t}{T}} - 1} \quad (14)$$

Значение  $A$  из выражения (6) можно принять равным единице, т. к.  $\frac{r^2}{\sqrt{L_2 L_3}} = \delta_2$  и, принимая во внимание, что  $e^{\ln x} = x$  соотношение энергии потерь в стали (12), в меди обмотки возбуждения (13) и в меди демпферной обмотки (14) запишется в таком виде:

$$k_{\text{фс}} = -0,625 \left( k^2 \ln \frac{k-0,95}{k} + 0,95k + 0,45 \right) \quad (15)$$

$$k_{\text{фме}} = \frac{B[B(0,95k - 0,45) - 1,9k] - k^2 \ln \frac{k-0,95}{k}}{3 + B(0,5B - 1,9)} \quad (16)$$

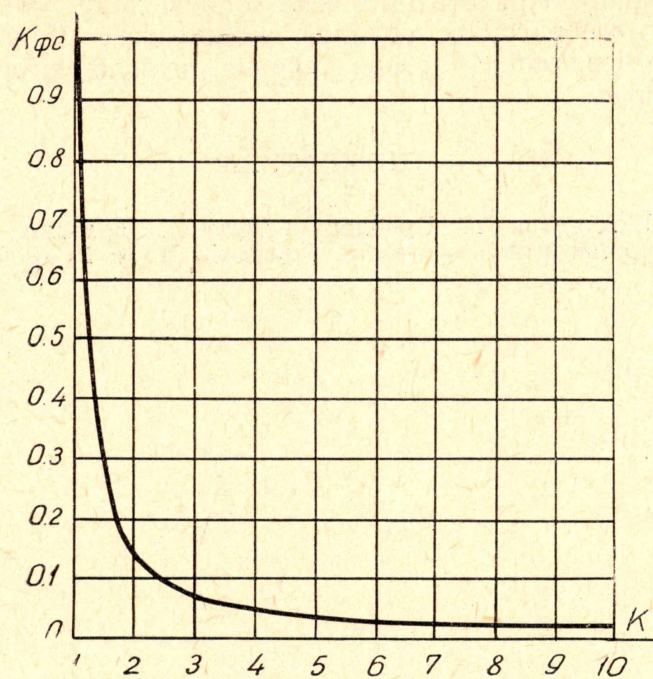
$$k_{\text{фмд}} - 1,9k = 0,9 \quad (17)$$

Результаты расчета влияния форсировки возбуждения на величину энергии потерь в стали и меди представлены на рис. 2 и рис. 3. Кроме того на рис. 3 показано влияние параметров демпферной обмотки на характер распределения медных потерь в зависимости от коэффициента форсировки возбуждения.

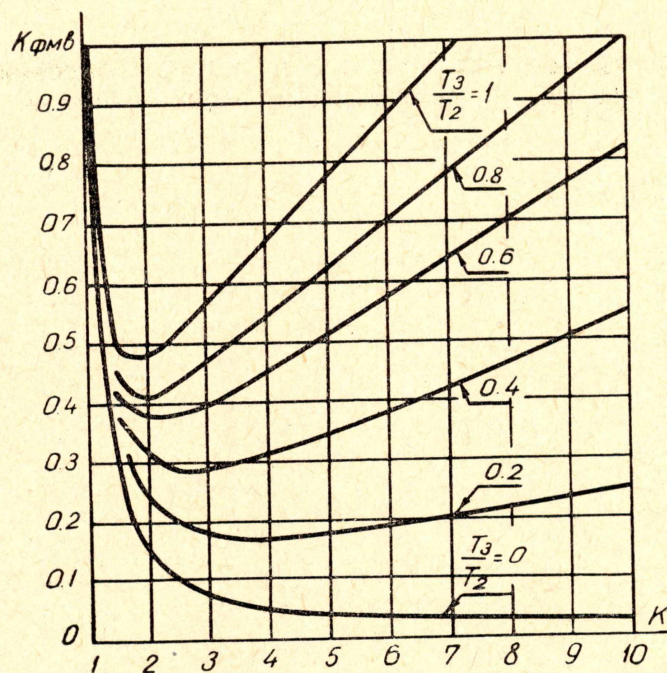
Как следует из рис. 2, потери в стали с увеличением коэффициента форсировки возбуждения от  $k=1$  до  $k=2$  уменьшаются примерно на 80 проц. При дальнейшем увеличении  $k$  потери уменьшаются в меньшей степени.

Величина потерь в меди, как это следует из рис. 3, при увеличении коэффициента форсировки возбуждения изменяется по-разному в зависимости от соотношения параметров демпферной обмотки и обмотки возбуждения. Однако во всех случаях при увеличении коэффициента форсировки от 1 до 2 потери в меди уменьшаются. Если  $0,5 T_2 \leq T_3 \leq T_2$ , то при  $k > 2$  потери в меди увеличиваются.





Р и с. 2. Зависимость потерь в стали от коэффициента форсировки возбуждения.



Р и с. 3. Зависимость потерь в меди от коэффициента форсировки возбуждения при различных соотношениях параметров обмоток ротора.

Оптимальный коэффициент форсировки возбуждения с точки зрения минимума потерь энергии можно найти из условия минимума потерь в меди и стали. Для генераторов ударной мощности с отношением  $\frac{T_3}{T_2} = 0,5 \div 0,7$  этот коэффициент лежит в пределах 4—6.

Таким образом, применение форсировки возбуждения при прерывистом возбуждении позволяет не только увеличить ударную мощность,



но и значительно сократить потери холостого хода, что имеет важное значение для генераторов ударной мощности, так как в них из-за уменьшенного воздушного зазора условия отвода потерь хуже, чем в турбогенераторах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. М. Постников. Проблема получения больших величин кратковременной электромагнитной мощности. Труды ЛИИ, № 2, 1937.