

## УЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ УГЛА КОММУТАЦИИ

*В. А. Лукутин*

(Представлено профессором, доктором техн. наук В. К. Щербаковым)

Благодаря анодным реактивным сопротивлениям в работающем преобразователе ток при зажигании очередного анода переходит на него не сразу, а постепенно, причем в момент этого перехода погасающий и загорающийся вновь аноды горят одновременно, что принято называть коммутацией. Доля периода основной частоты в угловых единицах, в течение которой происходит одновременное горение анодов, называется углом коммутации.

Из общей теории преобразователей известно, что угол коммутации зависит от таких факторов, как величина рабочего тока, реактивность анодных цепей и напряжение на входе и выходе преобразователя. Если мощность преобразователя мала по сравнению с мощностью питающей энергосистемы, то в качестве анодной реактивности берется сопротивление питающего трансформатора, а напряжение на входе преобразователя принимается за противоз. д. с.

В настоящее время преобразовательные установки сооружаются на очень большие мощности, а иногда они составляют основную нагрузку энергосистемы. В таких случаях пренебрегать параметрами электрической системы нельзя и в качестве анодной реактивности следует брать эквивалентное сопротивление системы, точно так же и вместо напряжения на входе преобразователя следует брать эквивалентную э. д. с. системы. Эквивалентная э. д. с. обуславливается э. д. с. генераторов системы. Но известно, что генераторы в расчетных схемах могут замещаться синхронными, переходными и сверхпереходными параметрами в зависимости от того, в каком режиме работают эти генераторы.

При определении угла коммутации наиболее полно можно учесть параметры элементов электрической системы, если рассматривать перекрытие анодов как двухфазное короткое замыкание за питающим трансформатором преобразователя.

Если постоянный ток преобразователя не содержит пульсации ( $I_d = \text{const}$ ), то перекрытие будет продолжаться до тех пор, пока ток коммутации в загоревшемся вновь аноде не достигнет значения тока  $I_d$ . Значит угол коммутации будет зависеть от величины тока двухфазного короткого замыкания, а последний зависит от времени.

Процесс коммутации длится очень непродолжительное время (около 0,001 сек), поэтому существует мнение, что в расчетных схемах генераторы следует замещать сверхпереходными параметрами. Однако это не соответствует действительности и может привести к ошибкам.

Известно, что характер изменения тока статора синхронных машин при коротких замыканиях можно проследить на процессах изменения их магнитных потоков, среди которых решающее значение имеет поток ротора. Проанализируем при помощи этого приема изменение во времени амплитудного значения тока статора при равномерно чередующихся коротких замыканиях. Для простоты

будем полагать, что чередующиеся короткие замыкания происходят у работающего вхолостую генератора.

При холостом режиме генератора в его обмотке возбуждения протекает ток, за счет которого создается магнитный поток ротора  $\Phi_{f0}$ . При первом замыкании в цепи (вступает в работу выпрямитель) в статорной обмотке возникает ток короткого замыкания, амплитуда которого достигает значения  $I_{mk0}$ .

В то же время в роторе появляются два новых магнитных потока: один является следствием статорного тока — поток реакции статора  $\Phi_{ad}$ , другой обусловлен свободными токами роторных цепей  $\Delta\Phi_p$ .

Если не принимать во внимание потоки рассеяния ротора, то в начальный момент времени  $\Phi_{ad}$  и  $\Delta\Phi_p$  полностью уравниваются друг друга. При наличии у генератора демпферных обмоток или контуров, им эквивалентных, свободный поток  $\Delta\Phi_p$  будет состоять из двух компонент. Одна компонента —  $\Delta\Phi'_p$  обусловлена свободным током обмотки возбуждения, а другая —  $\Delta\Phi_\delta$  — появляется под действием свободных токов в демпферных контурах.

Обе составляющие свободного потока сразу после своего возникновения начинают затухать, так как токи, их вызвавшие, не имеют поддерживающих э. д. с. Но затухают они с различными постоянными времени. Так, составляющая  $\Delta\Phi_\delta$  затухает весьма быстро ввиду незначительной индуктивности демпферных контуров и исчезает менее чем за 0,5 сек, в то время как поток  $\Delta\Phi'_p$  затухает значительно медленнее в течение нескольких секунд.

Результирующий магнитный поток  $\Phi_f$ , сцепляющийся со статорной обмоткой и равный сумме

$$\Phi_f = \Phi_{f0} + \Delta\Phi'_p + \Delta\Phi_\delta - \Phi_{ad},$$

будет также затухать.

Если бы короткое замыкание продолжалось неопределенно продолжительное время, то поток  $\Phi_f$  уменьшился бы до некоторого значения, соответствующего установившемуся току короткого замыкания, и свободный поток  $\Delta\Phi_p$  исчез бы совершенно.

Однако в нашем случае через малый промежуток времени (для мостовой схемы порядка  $t = 0,001$  сек) короткое замыкание или, иначе говоря, коммутация прекращается. Исчезает и поток реакции статора, а результирующий поток  $\Phi_f$  оказывается меньше своего вынужденного значения  $\Phi_{f0}$ .

В первое мгновение после ликвидации короткого замыкания согласно принципу инерции результирующий магнитный поток сохраняет свое значение за счет свободных токов роторных цепей. Эти токи возникают как в обмотке возбуждения, так и в демпферных контурах и снова будут затухать с теми же самыми постоянными времени, что и свободные токи при коротком замыкании. Разница будет лишь в том, что направление этих токов будет противоположное вынужденному току в обмотке возбуждения, в то время как при перекрытии анодов свободные токи были направлены так же, как вынужденный.

Соотношение между свободными потоками роторной  $\Delta\Phi'_p$  и демпферной  $\Delta\Phi_\delta$  обмотками будет одинаковым при возникновении потока реакции  $\Phi_{ad}$  и при его исчезновении, что видно на рис. 1.

Это соотношение определяется параметрами обмоток.

На рис. 1 обозначено:

$\Phi''_{f0}$  — поток ротора, соответствующий сверхпереходному току короткого замыкания;

$\Phi'_{f0}$  — поток ротора, соответствующий переходному току короткого замыкания;

$\Phi_{\kappa}$  — поток ротора, соответствующий установившемуся значению тока короткого замыкания.

За короткие интервалы времени, соответствующие перекрытию анодов и их отдельному горению, свободная составляющая магнитного потока роторной обмотки не успевает заметно измениться, так как постоянная времени этой обмотки весьма велика. Поток же демпферной обмотки за эти промежутки времени заметно затухает, что и изображено на рис. 1. Суммарный магнитный поток, пронизывающий воздушный зазор машины, будет в любой момент времени равен сумме всех потоков:

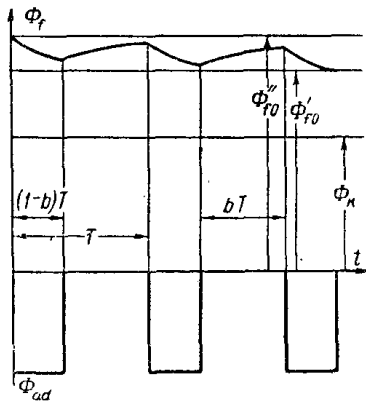
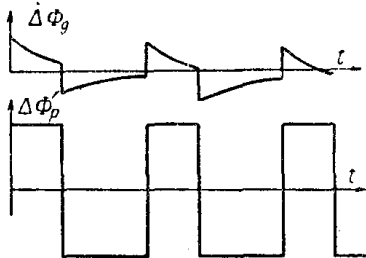


Рис. 1.

Суммарный магнитный поток, пронизывающий воздушный зазор машины, будет в любой момент времени равен сумме всех потоков:

$$\Phi_f = \Phi''_{f0} - \Phi_{ad} + \Delta\Phi'_p + \Delta\Phi_3. \quad (1)$$

Кривая изменения этого потока состоит из участков показательных функций. К моменту повторного перекрытия анодов поток ротора  $\Phi_f$  будет меньше, чем при

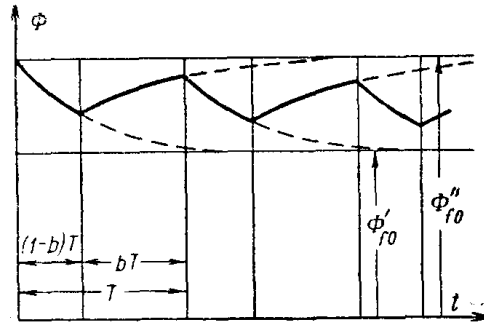


Рис. 2.

первом перекрытии. Далее картина будет повторяться, причем в каждом новом цикле результирующий поток будет все меньше и меньше, стремясь к некоторому определенному для данного соотношения продолжительностей коммутационного и внекоммутационного периодов значению.

В первых коммутационных участках результирующий магнитный поток повторяет форму потока демпферной обмотки, поскольку поток роторной обмотки не успевает за это время измениться. Поэтому возникает возможность рассмотреть порознь процессы за счет демпферной и роторной обмоток.

Будем полагать, что переходный процесс за счет потока демпферной обмотки примет некоторое стабильное значение, в то время как в роторной обмотке магнитный поток  $\Delta\Phi'_p$  еще не успел измениться. Тогда результирующий поток будет изменяться по кривой, как изображено на рис. 2.

Найдем установившееся значение магнитного потока ротора  $\Phi_f$  для заданного соотношения времени коммутационного участка  $(1-b)T$  и внекоммутационного —  $bT$ .

На первом коммутационном участке поток изменяется по закону:

$$\Phi_f'' = \Phi'_{f0} + (\Phi''_{f0} - \Phi'_{f0}) e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

К концу перекрытия, при  $t = (1-b)T$ , его значение будет:

$$\Phi_f'' = \Phi'_{f0} + (\Phi''_{f0} - \Phi'_{f0}) e^{-\frac{(1-b)T}{\tau}}.$$

По аналогии на первом внекоммутационном участке поток будет изменяться по такому закону:

$$\Phi''_f = \Phi''_{f0} - (\Phi''_{f0} - \Phi''_f) e^{-\frac{t}{\tau}},$$

или

$$\Phi''_f = \Phi''_{f0} - \Phi''_{f0} e^{-\frac{t}{\tau}} + \Phi'_{f0} e^{-\frac{t}{\tau}} + (\Phi''_{f0} - \Phi'_{f0}) e^{-\frac{(1-b)T+t}{\tau}}.$$

Через интервал времени  $T$ , т. е. к концу первого цикла, поток принимает значение:

$$\Phi''_{f1} = \Phi''_{f0} - (\Phi''_{f0} - \Phi'_{f0}) e^{-\frac{bT}{\tau}} + (\Phi''_{f0} - \Phi'_{f0}) e^{-\frac{T}{\tau}}. \quad (2)$$

Величина  $\Phi''_{f1}$  определяет начальное значение потока к началу повторного перекрытия. Припасовывая, таким образом, последующие интервалы, можно найти начальное значение магнитного потока ротора при перекрытии в  $(n+1)$  цикле:

$$\begin{aligned} \Phi''_{fn} = \Phi''_{f0} - (\Phi''_{f0} - \Phi'_{f0}) & \left[ e^{-\frac{bT}{\tau}} - e^{-\frac{T}{\tau}} + e^{-\frac{T+bT}{\tau}} - e^{-\frac{2T}{\tau}} + \right. \\ & \left. + \dots + e^{-\frac{(n-1)T+bT}{\tau}} - e^{-\frac{nT}{\tau}} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Нетрудно убедиться, что в формуле (3) вторая скобка обращается в единицу при  $b=0$ , а при  $b=1$  — в нуль.

Если обозначить сумму бесконечного знакопеременного ряда, который стоит в этой скобке, через  $S_\infty$ , то можно записать очевидное

неравенство:

$$0 \leq S_\infty \leq 1. \quad (4)$$

Упомянутый знакопеременный ряд можно легко представить графически, как показано на рис. 3.

Согласно этому рисунку, при достаточно малых  $T$  сумма бесконечного знакопеременного ряда будет равна:

$$S_\infty = (1-b), \quad (5)$$

где  $b$  — доля внекоммутационного промежутка времени от суммы времени перекрытия и отдельного горения анодов.

Учитывая зависимость (5), можно найти предельное значение магнитного потока в начале бесконечного перекрытия:

$$\Phi''_{f\infty} = \Phi''_{f0} - (\Phi''_{f0} - \Phi'_{f0})(1-b),$$

или, иначе,

$$\Phi''_{f\infty} = \Phi'_{f\infty} + (\Phi''_{f0} - \Phi'_{f0})b. \quad (6)$$

В этой последней формуле  $\Phi'_{f\infty}$  означает установившееся значение магнитного потока ротора в бесконечном коротком замыкании. Нетрудно заметить, что это значение магнитного потока может быть найдено совершенно аналогично:

$$\Phi'_{f\infty} = \Phi_k + (\Phi'_{f0} - \Phi_k)b. \quad (7)$$

Подставив (7) в (6), можно получить следующее равенство:

$$\Phi''_{j\infty} = \Phi_k + (\Phi''_{j0} - \Phi_k) b. \quad (8)$$

Если генератор не имеет демпферных контуров, то вместо формулы (8) следует пользоваться формулой (7).

Если учесть, что магнитному потоку  $\Phi_k$  соответствует реактивное сопротивление  $x_d$  — синхронная реактивность генератора, потоку  $\Phi'_{j0}$  соответствует переходная реактивность  $x'_d$ , а потоку  $\Phi''_{j0}$  — сверхпереходная реактивность  $x''_d$ , то формулы (7) и (8) могут быть записаны в таком виде:

$$\left. \begin{aligned} x''_2 &= x_d + (x''_d - x_d) b; \\ x'_2 &= x_d + (x'_d - x_d) b. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Из этих формул видно, что при различных продолжительностях коротких замыканий генератор следует в расчет вводить различными реактивностями. Так, например, если периодические короткие замыкания длятся очень малое время (что справедливо для  $\gamma \rightarrow 0$ ), то  $b \rightarrow 1$  и генератор следует замещать соответственно  $x''_d$  и  $x'_d$ . Если же процесс короткого замыкания продолжительный, что соответствует  $b \rightarrow 0$ , то для обоих типов генераторов следует использовать  $x_d$ .

Если рассматривать процесс коммутации как чередующееся короткое замыкание за трансформатором преобразователя, то приведенные выше выводы можно распространить и на случай работы генератора на преобразователь. При этом в расчеты генератор следует вводить реактивностями, подсчитанными по формуле (9). Кроме того, следует иметь в виду, что угол перекрытия преобразователя после начала работы последнего некоторое время будет изменяться, пока не достигнет определенной величины для данных параметров схемы.