

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН ОБРАТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ГАШЕНИИ ПОЛЯ УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Г. А. Сипайлов, А. И. Верхотуров

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Гашение магнитного поля является единственным способом, позволяющим ограничить размеры повреждений электрических машин при внутренних коротких замыканиях.

Для ударного генератора вопросы гашения поля приобретают особую актуальность в связи со специфическими условиями его работы. Для повышения импульсной мощности ударные генераторы часто возбуждаются до более высокого напряжения, чем номинальное, поэтому оставлять напряжение после импульса тока статора на таком высоком уровне даже на короткое время опасно по условиям нагрева и необходимо развозбуждать машину.

Ударные генераторы обладают мощной демпферной обмоткой, постоянная времени которой соизмерима с постоянной времени обмотки возбуждения и поэтому даже при полном отключении обмотки возбуждения перенапряжений на ней не возникает, так как энергия передается успокоительной обмотке. С другой стороны, наличие успокоительной обмотки увеличивает постоянную времени всей системы возбуждения.

Так как все демпфирующие контуры замкнуты накоротко, то единственной возможностью осуществить быстрое гашение является воздействие на магнитное поле демпфирующих контуров каким-нибудь другим магнитным полем противоположного направления. Таким полем может быть поле обмотки возбуждения, если на нее подать напряжение противоположного знака. Изменение полярности на кольцах ротора легко осуществить путем инвертирования ионного или электромашинного возбудителя, а также при использовании схемы с дугогасительной решеткой [1, 2, 3].

При выбранном способе гашения снижение напряжения с заданного значения до нуля может быть произведено при различных величинах обратного напряжения, подводимого к обмотке возбуждения. Поэтому возникает вопрос о выборе такой величины обратного напряжения, при которой суммарные электромагнитные потери холостого хода при снижении напряжения с заданного значения до определенного были бы минимальными.

При машинной системе возбуждения изменение полярности напряжения, подводимого к обмотке возбуждения, значительно удобнее производить на стороне возбуждения возбудителя. При расчетах же будем предполагать, что изменение полярности осуществляется непосредственно в цепи ротора ударного генератора. Как показывают расчеты, при малой постоянной времени цепи возбуждения возбудителя T_B относи-

тельно суммарной постоянной контуров ротора $T \left(\frac{T_B}{T} \ll 0,05 \right)$ характер протекания переходного процесса и время спада напряжения с заданного значения до нуля или любого другого значения остаются практически такими же, как и при гашении непосредственно в цепи обмотки возбуждения ударного генератора. Это допущение еще больше оправдывается при полупроводниковой или ионной системе возбуждения.

Для решения поставленной задачи рассмотрим гашение поля ненагруженной машины путем изменения полярности напряжения, подводимого к обмотке возбуждения ударного генератора:

$$\left. \begin{aligned} r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} &= -ku_2 \\ r_3 i_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{32} \frac{di_2}{dt} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

r_2, L_2 — активное сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения с учетом параметров возбудителя;

M_{23}, M_{32} — взаимоиנדуктивности обмоток ротора;

k — кратность обратного напряжения, подводимого к обмотке возбуждения по сравнению с номинальным;

r_3, L_3 — эквивалентные параметры демпферной системы с учетом параметров массива ротора и клина.

Погрешность, возникающая при аналитическом определении эквивалентных параметров массива ротора, оказывает меньшее влияние на характер переходных процессов при гашении, чем в турбогенераторах, так как постоянная времени одного массива составляет примерно 10—20% от постоянной времени собственно демпферной обмотки.

Так как в ударных генераторах приняты специальные меры по снижению потоков рассеяния обмоток ротора (экранирование лобовых частей, увеличение ширины паза под демпферную обмотку по сравнению с шириной паза под обмотку возбуждения и т. д.), то общий коэффициент рассеяния контуров ротора находится в пределах $\delta \leq 0,03 \div 0,05$ и при расчетах переходных процессов при гашении рассеянием контуров ротора можно пренебречь. С учетом последнего допущения решение системы (1) имеет вид

$$i_2 = \frac{u_2}{r_2} \left[(1+k) \text{Ve}^{-\frac{t_r}{T}} - k \right], \quad (2)$$

$$i_3 = \frac{u_2}{r_2} (k+1)(1-B) e^{-\frac{t_r}{T}}, \quad (3)$$

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

$B = \frac{1}{1 + \frac{T_3}{T_2}}$ — величина, зависящая от отношения постоянных времени демпферной системы и обмотки возбуждения.

Главный поток в машине определяется суммарным током обеих обмоток и коэффициентом взаимоиנדукции между ротором и статором

$$\Phi_r = \frac{u_2}{r_2} M_{12} \left[(1+k) e^{-\frac{t_r}{T}} - k \right]. \quad (4)$$

Время гашения можно определить из условия равенства суммарного тока обмоток нулю

$$t_r = T \ln \frac{k+1}{k}. \quad (5)$$

Выразим энергию потерь, выделяющуюся в обмотках ротора при снижении напряжения от заданной величины до нуля в зависимости от коэффициента форсированного развозбуждения k .

Для обмотки возбуждения

$$Q_{2r} = \int_0^{t_r} i_2^2 \cdot r_2 \cdot dt = \frac{u_2^2}{r_2} T \left(k^2 \ln \frac{k+1}{k} - 2kV + B^2k + 0,5B^2 \right). \quad (6)$$

Для демпферной обмотки

$$Q_{3r} = \int_0^{t_r} i_3^2 \cdot r_3 \cdot dt = 0,5 \frac{u_2^2}{r_2} T (2k+1) B (1-B). \quad (7)$$

При снижении напряжения от заданного значения до нуля, кроме потерь в обмотках ротора, выделяются потери в стали машины, которые пропорциональны квадрату потока

$$Q_{cr} = \frac{P_0'}{\Phi_0^2} \int_0^{t_r} \Phi_r^2 \cdot dt = P_0' T \left(k^2 \ln \frac{k+1}{k} - k + 0,5 \right), \quad (8)$$

где P_0' — потери холостого хода в стали машины,

Φ_0 — установившееся значение потока,

w_1 — число витков обмотки статора,

Сложив потери энергии в стали машины и в обмотках ротора, получим зависимость суммарных потерь от коэффициента форсированного развозбуждения

$$Q_{\Sigma r} = \frac{u_2^2}{r_2} T \left[k^2 (k_0 + 1) \ln \frac{k+1}{k} - (k_0 + B)(k - 0,5) \right], \quad (9)$$

где $k_0 = \frac{P_0' r_2}{u_2^2}$ — отношение электромагнитных потерь холостого хода в стали к потерям в обмотке возбуждения.

Обозначим $k_{\Sigma r} = \frac{Q_{\Sigma r}}{Q'_{\Sigma r}}$, где $Q'_{\Sigma r}$ — суммарные потери энергии

при гашении поля для $k=1$, тогда

$$k_{\Sigma r} = \frac{k^2 (k_0 + 1) \ln \frac{k+1}{k} - (B + k_0)(k - 0,5)}{0,1931k_0 - 0,5B + 0,6931}. \quad (10)$$

Результаты расчета по (10) представлены на рис. 1 для $k_0=10$ и $\frac{T_3}{T_2} = 0,4 \div 1$. Из рис. 1 видно, что имеется такой коэффициент форсированного развозбуждения, при котором энергия потерь за время снижения напряжения от заданной величины до нуля получается минимальной.

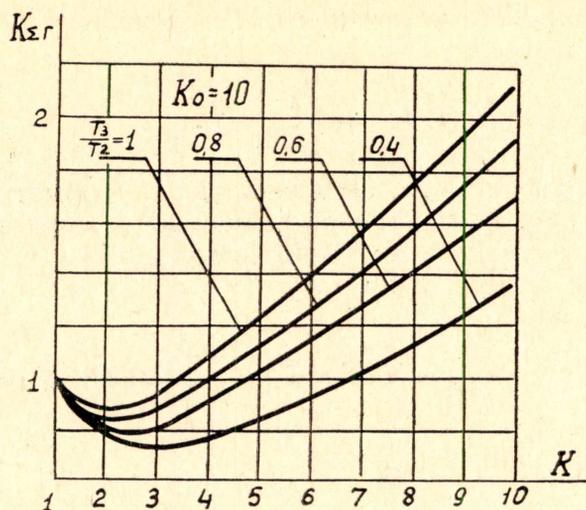


Рис. 1. Сравнение суммарных потерь при форсированном развозбуждении с потерями при $k=1$

Величину оптимального коэффициента форсированного развозбуждения можно найти, приравняв производную от $Q_{\Sigma r}$ по k нулю

$$2k \ln \frac{k+1}{k+n} - \frac{k}{k+1} - \frac{k_0+B}{k_0+1} = 0. \quad (11)$$

Трансцендентное уравнение (11) может быть решено приближенно с любой степенью точности относительно k . Значения коэффициентов форсированного развозбуждения, при которых потери будут минимальными, обозначаются через k_{opt} и называются оптимальными. Значения оптимальных коэффициентов форсированного развозбуждения, определенные из решения уравнения (11) для $k=4 \div 10$ при изменении $\frac{T_3}{T_2} = 0,4 \div 1$, представлены на рис. 2.

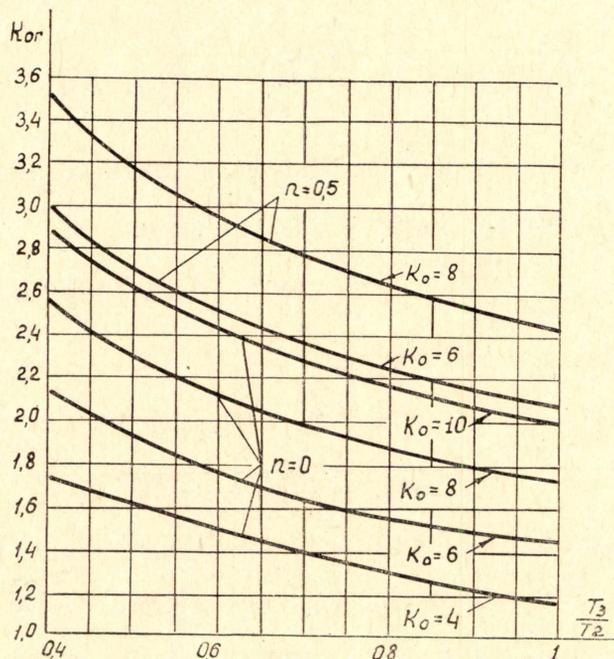


Рис. 2. Оптимальные коэффициенты форсированного развозбуждения

Сравним энергию потерь, которая выделяется в стали машины и в обмотках ротора при работе с оптимальным коэффициентом форсированного развозбуждения с энергией потерь, которая выделялась бы в машине, если бы напряжение на зажимах генератора не снижать, однако время действия постоянного напряжения оставить равным промежутку времени гашения поля с оптимальным коэффициентом форсированного развозбуждения:

$$k_{\Sigma r1} = k_{ог}^2 - \frac{(B + k_0)(k_{ог} - 0,5)}{(k_0 + 1) \ln \frac{k_{ог} + 1}{k_{ог}}} \quad (12)$$

Результаты расчетов по (12) представлены в табл. 1 для $\frac{T_3}{T_2} = 0,4 \div 1$ и $k_0 = 6 \div 10$.

Таблица 1

Значения коэффициентов $k_{\Sigma r1}$

$\frac{T_3}{T_2}$	k_0		
	6	8	10
1	0,42	0,45	0,47
0,8	0,43	0,41	0,48
0,6	0,45	0,47	0,49
0,4	0,59	0,4	0,51

Как видно из табл. 1, потери энергии при постоянном возбуждении примерно в 2 раза больше потерь энергии при гашении с оптимальным коэффициентом.

Если в уравнение (10) вместо k подставить $k_{ог}$, то это уравнение показывает отношение энергии потерь при оптимальном коэффициенте форсированного развозбуждения к энергии потерь при $k=1$.

Результаты расчетов показывают, что при снижении напряжения с оптимальным коэффициентом форсированного развозбуждения потерь выделяется примерно в 1,5 раза меньше по сравнению с потерями при $k=1$.

Аналогично можно найти коэффициент форсированного развозбуждения, при котором снижение напряжения с определенного значения до нуля сопровождается выделением в роторе минимального количества энергии электромагнитных потерь.

Для нахождения оптимальных коэффициентов форсированного развозбуждения из условия минимума электромагнитных потерь энергии в роторе можно использовать уравнение (11), обозначив в нем через k_0 отношение потерь холостого хода в стали ротора к потерям в обмотке возбуждения.

В суммарных потерях энергии, выделяющихся в машине при снижении напряжения от заданного значения до нуля, отдельные составляющие потерь с изменением k ведут себя неодинаково. Так, потери энергии в стали с увеличением k уменьшаются, тогда как потери в обмотке возбуждения и демпферной — увеличиваются. Поэтому снижение напряжения с оптимальным коэффициентом форсированного развозбуждения можно применять только в том случае, если потери в обмотке возбуждения, а также в роторе в целом за время снижения не превышают допустимых по условиям нагрева потерь.

Для машин с косвенным охлаждением обмоток, где пределы коле-

баний допустимых значений удельных нагрузок невелики, с достаточной для практики точностью о тепловом состоянии машины можно судить по величине удельной тепловой нагрузки.

Допустимая удельная тепловая нагрузка A_p для роторов с косвенным воздушным охлаждением находится в пределах $0,9 \div 1,1$ вт/см², а для обмотки возбуждения — $0,25 \div 0,3$ вт/см² [4].

Если снижение напряжения производится не до нуля, а до любого значения, то оптимальный коэффициент форсированного развозбуждения можно найти из уравнения

$$2k \ln \frac{k+1}{k+n} - (1-n) \left[\frac{k^2}{(k+1)(k+n)} + \frac{B+k_0}{k_0+1} \right] = 0, \quad (13)$$

где n — коэффициент, показывающий, до какого значения производится снижение напряжения. Результаты решения уравнения (13) представлены на рис. 2 для $n=0,5$, $k_0=6$ и $k_0=8$ при изменении $\frac{T_3}{T_2} = 0,4 \div 1$.

Таким образом, в машинах с демпферной обмоткой существует такой коэффициент форсированного развозбуждения, при котором суммарные электромагнитные потери энергии при снижении напряжения на зажимах генератора с заданного значения до определенного получают минимальными.

Осуществление гашения поля с оптимальным коэффициентом форсированного развозбуждения позволяет сократить потери энергии по сравнению с потерями при постоянном возбуждении за то же самое время примерно в 2 раза и почти в 1,5 раза по сравнению с потерями, выделяющимися в машине при снижении напряжения при $k=1$.

Снижение напряжения с оптимальным коэффициентом форсированного развозбуждения целесообразно только в том случае, если потери, выделившиеся за время снижения в обмотке возбуждения и в роторе в целом, не будут превышать потерь, допустимых по условиям нагрева.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Никифорский. К вопросу о форсированном развозбуждении синхронной машины. «Электричество», 1963, № 9.
2. Fischer Rolf. О выборе оптимальных величин обратного напряжения и добавочного сопротивления для гашения поля синхронной машины, экспрессинформация. «Электрические машины и аппараты». № 32, реф. 130, 1967.
3. О. Б. Брон. Автоматы гашения магнитного поля. Госэнергоиздат, 1961.
4. В. В. Титов Г. М. Хуторецкий. Турбогенераторы. Расчет и конструкция. «Энергия», 1967.