

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В БЕСКОНТАКТНЫХ СОВМЕЩЁННЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРАХ

Клементьев А.В.

Таврийский факультет Херсонского национального технического университета, ООО "КЛГ-ИНЖИНИРИНГ" Украина, 74900, Херсонская обл., Новая Каховка, ул. Первомайская, 35, каф. "Электрические машины и аппараты" тел. +38(05549) 7-85-15, факс +35(05549) 7-95-00, e-mail KLG@kahovka.net

Досліджуються особливості розрахунку струмів несиметричних коротких замикань в безконтактних синхронних генераторах з поєднанням по магнітопроводу і обмоткам ротора.

Исследуются особенности расчёта токов несимметричных коротких замыканий в бесконтактных синхронных генераторах с совмещением по магнитопроводу и обмоткам ротора.

ВВЕДЕНИЕ

Несимметричные короткие замыкания существуют кратковременно, что обеспечивается защитой, однако они оказывают сильное влияние на работу, как генератора, так и потребителя. Поэтому их анализ является важным этапом при проектировании генераторов и выборе системы защиты.

При внезапных несимметричных коротких замыканиях возникают также переходные процессы, однако **целью данной статьи** является выявление главных особенностей установившихся однофазных и двухфазных коротких замыканий на зажимах бесконтактного совмещённого по магнитопроводу и обмоткам ротора явнополюсного синхронного генератора при работе на холостом ходу, а также найти соотношение, позволяющее оценить токи при этих замыканиях.

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В ГЕНЕРАТОРЕ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Конструктивные особенности генераторов рассматриваемого типа изложены в работах [1÷3]. На статоре таких машин находятся силовая обмотка (статорная обмотка генератора - СОГ) и обмотка возбуждения возбудителя (ОВВ). Обмотка ротора состоит из нескольких частей, каждая из которых в свою очередь состоит из отдельных катушек, соединённых между собой через переключающие устройства. При изменении состояния этих устройств по определённому закону по обмотке ротора протекает ток, возбуждающий генератор. В наиболее простом виде функции переключающих устройств могут выполнять диоды при их естественной коммутации от ЭДС, которая индуцируется в частях обмотки ротора через магнитное поле тока ОВВ. В этом случае по катушкам обмоток ротора протекают постоянный и синусоидальный ток частоты $\frac{f \cdot p_b}{p}$ (f , p - частота тока и число полюсов генератора, p_b - полюсность ОВВ), при этом постоянный ток является током возбуждения генератора, а синусоидальный ток создаёт поле, имеющее полюсность ОВВ. Величинами высших гармонических тока можно пренебречь [5, 6].

В данной статье рассматриваются явнополюсные генераторы, у которых полюсность СОГ с соединением фаз в звезду вдвое превышает полюсность ОВВ.

На рис. 1 изображён ротор четырёхполюсной машины. На статоре помимо СОГ располагаются обмотка питания регулятора и двухполюсная ОВВ. Обмотка ротора является двухфазной по синусоидальному току, который создаёт вращающееся поле, неподвижное относительно статора, что исключает индуктирование паразитной ЭДС в ОВВ [3].

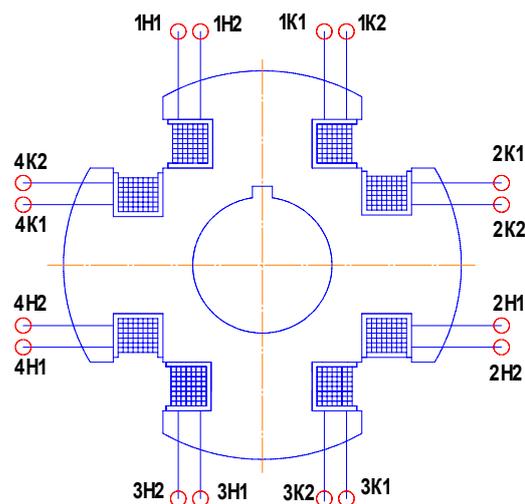


Рис. 1. Ротор с двухфазной обмоткой по переменному току

На рис. 2 приведена схема соединения концов катушек обмотки ротора исследуемого генератора через полупроводниковые диоды. В катушках обмотки ротора дополнительно индуцируются ЭДС через обратно-синхронное поле (ОСП) тока СОГ при несимметричном коротком замыкании.

ЭДС $E_{r2\gamma}$ одинакова по фазе во всех катушках обмотки ротора, соединённых между собой, и является практически синусоидальной с частотой $2f$, поскольку ротор и ОСП вращаются в противоположных направлениях. Наличие этой ЭДС вызывает дополнительное подмагничивание ротора генератора за счёт увеличения постоянного результирующего тока его обмотки, что приводит к увеличению тока несимметричного короткого замыкания. Кроме того, протекающие по обмотке ротора токи двойной частоты

возбуждают пульсирующее поле, которое также может быть разложено на два.

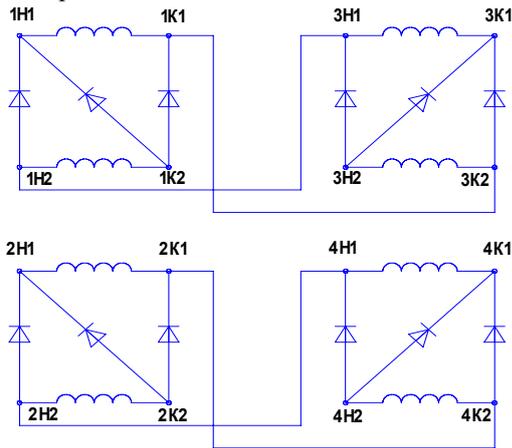


Рис. 2. Схема соединения концов катушек обмотки ротора

Через поле, вращающееся в направлении вращения ротора, в фазах СОГ индуцируется ЭДС генерируемой частоты, при этом действующее значение результирующей ЭДС уменьшается, что в свою очередь приводит к уменьшению тока несимметричного короткого замыкания до величины, обеспечивающей соответствующее электромагнитное равновесие.

ВЫВОД СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЁТА ТОКА КОРотКОГО ЗАМЫКАНИЯ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известны выражения для установившихся токов несимметричных коротких замыканий и токов обратной последовательности [4]. Эти выражения для трёхфазной системы в обобщённом виде и в комплексной форме записи можно представить следующим образом:

$$\underline{I}'_{k,2-\gamma} \approx \frac{(j \cdot \sqrt{3})^{\gamma+1} \cdot \underline{E}'_f}{j \cdot (\gamma \cdot x_0 + x_1 + x_2)}; \quad (1)$$

$$\underline{I}'_{2,\gamma} \approx (-1)^{\gamma+1} \frac{\underline{E}'_f}{j \cdot (\gamma \cdot x_0 + x_1 + x_2)}, \quad (2)$$

где $\gamma=0$ для двухфазного короткого замыкания, $\gamma=1$ для однофазного короткого замыкания, \underline{E}'_f - комплекс ЭДС возбуждения, x_0, x_1, x_2 - индуктивные сопротивления нулевой, прямой, и обратной последовательностей соответственно.

Штрихи в соотношениях (1) и (2) означают, что в них учитывается фактор подмагничивания индуктора через обратно-синхронное поле несимметричного короткого замыкания.

Ввиду повышенной сложности решения поставленной задачи было принято решение величину ЭДС E'_f представить в упрощённом виде:

$$E'_f = E_f + \alpha_\gamma \cdot E_{r2\gamma}, \quad (3)$$

где α_γ - эмпирический коэффициент.

Для расчёта ЭДС $E_{r2\gamma}$ разложим обратно-синхронное поле тока несимметричного короткого замыкания по отношению к ротору на два неподвиж-

ных пульсирующих синусоидальных поля. Ось одного из этих полей будет совпадать с продольной осью ротора – продольно-пульсирующая составляющая обратно-синхронного поля. Ось другого составит с продольной осью ротора электрический угол, равный $\frac{\pi}{2}$ – поперечно пульсирующая составляющая обратно-синхронного поля. Только через продольно пульсирующую составляющую индуцируется ЭДС $E_{r2\gamma}$. Запишем выражение для потокосцепления первой гармоники этого поля с катушкой обмотки ротора $\Psi_{adr\gamma}$, используя известные в классической теории синхронных машин соотношения [4]:

$$\Psi_{adr\gamma} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{w_f}{2p} \cdot k_{ad} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\mu_0}{k_{\mu d} \cdot k_\delta \cdot \delta} \times \right. \\ \left. \times \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{(\sqrt{3})^{1-\gamma} \cdot w_1 \cdot k_{обм1} \cdot I'_{2,\gamma}}{p} \right] \cdot \tau \cdot L_\delta,$$

где w_f - число витков обмотки ротора; k_{ad} коэффициент формы поля продольной реакции якоря; μ_0 - магнитная постоянная; $k_{\mu d}$ - коэффициент насыщения по продольной оси; k_δ - коэффициент воздушного зазора; δ - воздушный зазор; p - число пар полюсов; w_1 и $k_{обм1}$ - число витков фазы и обмоточный коэффициент первой гармоники СОГ; τ - полюсное деление; L_δ - расчётная длина якоря.

Соотношения (1) и (2) позволяют установить связь между модулями токов несимметричного короткого замыкания и обратной последовательности:

$$I'_{2,\gamma} = \frac{I_{k,2-\gamma}}{(\sqrt{3})^{\gamma+1}}. \quad (4)$$

Переходя к действующему значению ЭДС $E_{r2\gamma}$ с заменой тока обратной последовательности на ток короткого замыкания исходя из соотношения (4), получаем:

$$E_{r2\gamma} = \frac{1}{3^\gamma} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\mu_0 \cdot f}{p^2} \cdot \tau \cdot L_\delta \times$$

$$\times w_1 \cdot k_{обм1} \cdot w_f \cdot k_{ad} \cdot I'_{2,\gamma} = \frac{1}{3^\gamma} \cdot Q_{r2\gamma} \cdot I'_{2,\gamma}. \quad (5)$$

Разделив обе части выражения (3) на знаменатель выражений токов (1) и (2), получаем:

$$I'_{k,2-\gamma} = I_{k,2-\gamma} + \alpha_\gamma \cdot \frac{E_{r2\gamma}}{\gamma \cdot x_0 + x_1 + x_2}. \quad (6)$$

Ток $I_{k,2-\gamma}$ рассчитывается без учёта подмагничивания индуктора по известным соотношениям.

Результаты испытаний опытного образца восьмиполюсного генератора мощностью 8 кВт приведены в табл. 1 и 2. (при этом ток ОБВ 0,5 А, ток трёхфазного короткого замыкания равен 12 А) Они дают основание пренебречь в практических расчётах эффектом изменения тока при изменении полярности питания ОБВ, изменении направления (\pm) и частоты вращения ротора, а также зависимостью от того, ка-

кие фазы замыкаются и ограничиться интервальной оценкой значений токов несимметричного короткого замыкания.

Таблица 1
Токи однофазных коротких замыканий

Полярность питания ОВВ		Частота вращения, об/мин	Ток КЗ в замыкаемых фазах, А		
F1	F2		A	B	C
-	+	+650	56,3	53,0	56,4
-	+	-650	53,3	58,5	56,0
+	-	+650	55,7	53,0	57,0
+	-	-650	52,5	58,5	58,8
-	+	+750	59,3	56,3	60,0
-	+	-750	56,0	62,3	60,5
+	-	+750	58,8	56,6	60,5
+	-	-750	56,0	61,5	62,6
-	+	+900	64,5	60,0	65,0
-	+	-900	60,0	66,8	65,3
+	-	+900	63,0	60,8	65,3
+	-	-900	60,0	65,3	67,5

Таблица 2
Токи двухфазных коротких замыканий

Полярность питания ОВВ		Частота вращения, об/мин	Ток КЗ в замыкаемых фазах, А		
F1	F2		AB	BC	AC
-	+	+650	24,0	29,8	31,5
-	+	-650	25,0	32,8	30,3
+	-	+650	23,8	29,3	30,8
+	-	-650	24,9	32,5	29,3
-	+	+750	25,0	31,8	33,3
-	+	-750	26,0	34,8	32,3
+	-	+750	25,0	31,3	32,5
+	-	-750	25,8	34,5	31,0
-	+	+900	26,8	34,3	36,0
-	+	-900	28,0	37,3	34,5
+	-	+900	26,5	33,8	35,0
+	-	-900	27,3	37,0	33,5

Указанные изменения тока связаны с тем, что постоянная составляющая тока обмотки ротора сложным образом зависит от разности начальных фаз ЭДС $E_{r2\gamma}$ и ЭДС, индуцируемой от поля тока ОВВ, а также от соотношения их модулей.

После оценки значения эмпирического коэффициента α_γ по средним значениям токов и решения уравнения (6) относительно тока короткого замыкания находим следующее его выражение:

$$I'_{k,2-\gamma} \approx \frac{(0,8 \div 1,2) \cdot I_{k,2-\gamma}}{1 - 0,15 \cdot (\sqrt{3})^\gamma \cdot \frac{Q_{r2\gamma}}{\gamma \cdot x_0 + x_1 + x_2}}$$

Расчётные значения токов: однофазного короткого замыкания – (49÷70 А), двухфазного – (22÷37 А).

Такая же точность была достигнута и на трёх других опытных образцах генераторов рассматриваемого типа.

Вследствие подмагничивания индуктора токами несимметричных коротких замыканий известное соотношение ($I_{k1} : I_{k2} : I_{k3} \approx 3 : \sqrt{3} : 1$) в бесконтактных совмещённых по магнитопроводу синхронных генераторах не сохраняется, эти токи имеют увеличенные значения на 20÷40%.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Клементьев А.В. Расчёт ЭДС возбуждения бесконтактной синхронной машины с переменной структурой обмотки ротора // Электротехника і Електромеханіка. - 2005. - № 3. - С. 31-32.
- [2] Клементьев А.В. Определение соотношения между токами обмоток одного типа бесконтактной явнополюсной синхронной машины // Известия вузов. Электромеханика. 2005.- № 6. - С. 21- 23.
- [3] Клементьев О.В. Основні особливості суміщених синхронних генераторів зі структурою обмотки ротора, що періодично змінюється // Електротехніка і Електромеханіка (Харків). -2006. - № 2. - С. 30-31.
- [4] Вольдек А.И. Электрические машины. - М. - Л.: Энергия, 1974. - 839 с.
- [5] Клементьев А.В. Расчет ЭДС, взаимной и собственной индуктивностей обмоток бесконтактного совмещённого генератора // Технічна електродинаміка. – 1996. - №6. - С. 59-61.
- [6] Клементьев А.В., Олейников А.М. Особенности электромагнитных процессов в бесконтактном совмещённом генераторе с периодически изменяющейся структурой обмотки ротора // Электротехника. - №2000. - №3. - С. 22-25.

Поступила 17.10.2006