

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАСЫЩЕНИЯ НА ЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ЯВНОПОЛЮСНОГО ГЕНЕРАТОРА

Ларин А.М., Ткаченко А.А.

Донецкий национальный технический университет

Введение. Уточнение модели синхронной машины (СМ), отражающей влияние насыщения по путям магнитных потоков рассеяния, имеет существенное значение для расчета не только экстремальных значений, но и изменений во времени режимных параметров в цепях обмоток статора и ротора. Учет явления магнитного насыщения представляет сложную задачу, которую, при строгом подходе, можно решить на основе теории электромагнитного поля. Применение частотных характеристик (ЧХ) к анализу режимов при коротких замыканиях (КЗ) в электрических системах позволяет учитывать насыщения на параметры переходного режима [1, 2]. В этом случае для расчетов может быть использовано семейство ЧХ, которые учитывают реальное насыщения в функции тока при данном напряжении на статоре. Насыщение в различных элементах машины различно, поэтому при таком подходе речь может идти только о приближенном эквивалентном (интегральном) учете насыщения.

В настоящее время имеются методики определения электромагнитных параметров и ЧХ с учетом насыщения путей магнитных потоков электрических машин. В [3] разработана методика определения частотных характеристик и параметров эквивалентных схем замещения в функции протекающих в соответствующих контурах токов. В [4] изложены основные положения метода идентификации параметров турбогенераторов, основанного на экспериментальных данных, определяемых из опытов внезапного трехфазного короткого замыкания (ТКЗ). При этом получены зависимости параметров эквивалентного демпферного контура в функции начального значения тока КЗ для турбогенераторов серии ТВВ.

Известны и другие пути учета насыщения на частотные характеристики электрических машин [5]. Методика определения зависимости индуктивных сопротивлений рассеяния от значения токов в обмотке статора приведена в [3, 6]. Методы, основанные на определении совокупности электромагнитных параметров в статических режимах, позволяют учесть влияние насыщения только по основному пути магнитного потока по продольной оси.

В указанной связи требуется совершенствование существующих и разработка новых способов определения совокупности электромагнитных параметров при различных уровнях насыщения путей магнитных потоков. Задача обобщенного исследования влияния насыщения в рамках теории электрических цепей является весьма сложной. В этой связи возможный путь решения задачи определяется необхо-

димостью проведения серии однотипных экспериментов, отличающихся вариацией начальных условий по напряжению и току статора. Подход для определения влияния насыщения на электромагнитные параметры СМ на основе анализа параметров режима при ТКЗ описан в [4, 7].

Цель работы. Целью настоящей работы является разработка методики определения зависимостей индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток статора и ротора, а также частотных характеристик СМ, не имеющих демпферной системы, по данным опытов внезапного ТКЗ, восстановления напряжения после отключения установившегося ТКЗ и гашения электромагнитного поля, регламентируемых ГОСТ 10169-77 [8].

Материалы и результаты исследований. Для явнополюсных СМ, имеющих на роторе только обмотку возбуждения (рис.1а), зависимости от тока сопротивлений рассеяния обмотки статора $x_{\sigma}(I)$ и ротора $x_{\sigma f}(I)$, можно получить из двух опытов: гашения электромагнитного поля при короткозамкнутой обмотке статора и восстановления напряжения после отключения установившегося ТКЗ.

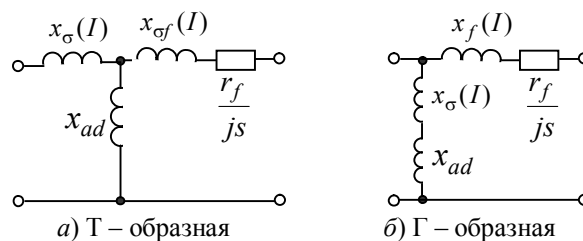


Рисунок 1 Схемы замещения СМ без демпферных обмоток (ось d)

Это может быть произведено путем последовательного выполнения следующих экспериментальных и расчетных процедур.

Из анализа переходных процессов в начальный момент восстановления напряжения после отключения ТКЗ следует, что ток в обмотке возбуждения скачком уменьшается на величину Δi_f для обеспечения постоянства потокосцепления обмотки возбуждения. Следовательно, индуктивное сопротивление рассеяния ОВ можно считать в этом опыте ненасыщенным, т.е. $x_{\sigma f}(I) = x_{\sigma f}(0)$. Переходное индуктивное сопротивление по продольной оси в соответствии со схемой замещения определяется следующим образом:

$$x'_d(I) = x_\sigma(I) + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma f}(0)}}. \quad (1)$$

Переходное сопротивление, входящее в левую часть (1), определяется по данным опытов восстановления напряжения при различных начальных токах установившегося КЗ в соответствии с рекомендациями [8]. Тогда из (1) получим выражение для определения значения сопротивления рассеяния обмотки статора в функции тока:

$$x_\sigma(I) = x'_d(I) - \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma f}(0)}}. \quad (2)$$

Из опытов гашения электромагнитного поля путем замыкания ОВ накоротко при короткозамкнутом состоянии обмотки статора определяется входное сопротивление со стороны обмотки возбуждения x'_f .

Для схемы замещения общепринятого Т – образного вида указанное сопротивление определяется аналогично переходному сопротивлению:

$$x'_f(I) = x_{\sigma f}(I) + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_\sigma(I)}}. \quad (3)$$

Из (3) следует выражение для определения индуктивного сопротивления рассеяния ОВ:

$$x_{\sigma f}(I) = x'_f(I) - \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_\sigma(I)}}. \quad (4)$$

Ненасыщенные значения индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток статора и ротора определяются путем совместного решения уравнений (1) и (3). При этом опыты восстановления напряжения и гашения электромагнитного поля должны осуществляться при токах возбуждения, при которых установившийся ток в обмотке статора не превышает 0,5 от номинального значения.

Использование значений переходных индуктивных сопротивлений, измеренных по данным опытов внезапного ТКЗ также, принципиально, позволяет определить зависимость индуктивного сопротивления рассеяния ОВ от начального значения периодической составляющей тока КЗ. В соответствии с (1) в этом случае имеем

$$x_{\sigma f}(I) = \frac{1}{\frac{1}{x'_d - x_\sigma(I)} - \frac{1}{x_{ad}}}. \quad (5)$$

Однако, исследования, выполненные в [9], свидетельствуют о существенном влиянии величины апериодической составляющей тока внезапного ТКЗ на определяемые параметры и, поэтому в настоящей работе не используются.

Частотные характеристики проводимости со стороны обмотки статора по продольной оси $Y_d(j\omega)$ при различных уровнях насыщения определяются по параметрам Т – образной схемы замещения:

$$Y_d(is) = \frac{1}{x_\sigma(I) + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{j\omega}{j\omega \cdot x_{\sigma f}(I) + r_f}}}. \quad (6)$$

Для повышения точности определения тока в обмотке возбуждения при исследовании частотным способом переходных процессов при внезапных коротких замыканиях необходимо иметь семейство частотных характеристик, представляющих собой комплексный коэффициент распределения тока статора в ветви обмотки возбуждения $C_f(j\omega)$, соответствующих разным уровням насыщения. В [10] предлагается методика экспериментального определения указанной характеристики по данным регистрации токов в обмотках статора и ротора при внезапном ТКЗ.

В соответствии с описанной методикой были определены зависимости индуктивных сопротивлений в функции тока статора синхронного явнополюсного генератора типа СГ-18,75 ($S_H=18,57$ кВА; $U_H=230$ В; $I_H=47$ А; $n = 1000$ об/мин.), имеющего малый межжелезный зазор под полюсами, равный 1,8 мм при диаметре расточки статора 405 мм.

Использовались результаты опытов внезапного ТКЗ, восстановления напряжения после отключения установившегося ТКЗ и гашения электромагнитного поля путем замыкания накоротко обмотки возбуждения из режима установившегося ТКЗ. Эксперименты повторялись многократно (от семи до девяти раз) для каждой из пяти серий, определяемых исходным значением тока возбуждения. Токи возбуждения выбирались таким образом, чтобы начальные значения периодической составляющей тока внезапного ТКЗ и установившиеся токи в других опытах составляли примерно 0,5; 1,0; 1,5 2,0 и 2,5 о.е. Для измерения токов в обмотках СГ использовались безындукционные шунты и осциллографические гальванометры, имеющие собственную частоту колебаний 2500 Гц. Принималось, что первые из серий опытов соответствуют ненасыщенному состоянию путей магнитных потоков. При определении параметров эквивалентной схемы замещения использовались следующие значения параметров генератора:

$$x_{ad} = 0,7787 \text{ о.е.}; \quad r_f = 0,000923 \text{ о.е.}$$

Ненасыщенные значения индуктивных сопротивлений рассеяния оказались равными:

$$x_\sigma = 0,041 \text{ о.е.}; \quad x_{\sigma f} = 0,1014 \text{ о.е.}$$

На рис.2 приведены результаты экспериментального определения переходного индуктивных сопротивлений x'_d при различных токах статора по данным опытов восстановления напряжения. Там же показаны рассчитанные в соответствии с (2) значения индуктивных сопротивлений рассеяния обмотки статора. Анализ зависимостей x'_d и x_σ от тока позволил получить аналитические выражения в функции тока статора при значении последних более 0,5 о.е.

$$x'_d(I) = 0,1307 \cdot e^{-0,072 \cdot I}, \quad (7)$$

$$x_{\sigma}(I) = 0,041 \cdot e^{-0,026 \cdot I} \quad (8)$$

Погрешность аппроксимации экспоненциальными зависимостями не превысила 4%.

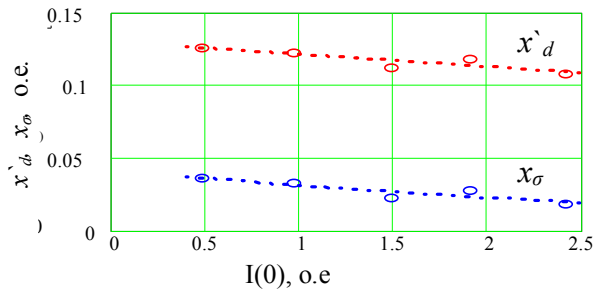


Рисунок 2. Зависимости изменения индуктивных сопротивлений СГ СГ-18,75 от значения периодической составляющей тока статора

На рис.3 представлены экспериментально полученные по данным опытов гашения электромагнитного поля зависимости входных сопротивлений со стороны обмотки возбуждения в начальный момент изменения режима x'_f .

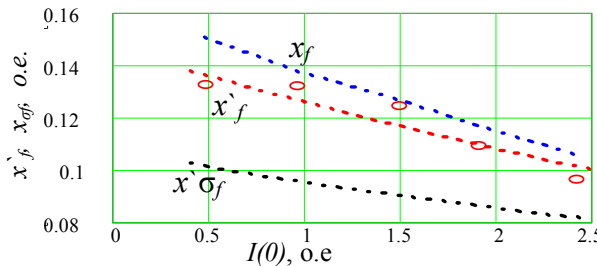


Рисунок 3. Зависимости изменения индуктивных сопротивлений СГ СГ-18,75 от значения тока КЗ

По экспериментальным точкам была проведена аппроксимация изменения сопротивлений от тока. Предполагалось, что изменения носят экспоненциальный характер. Параметры экспоненты определялись методом наименьших квадратов.

$$x'_f(I) = 0,147 \cdot e^{-0,153 \cdot I} \quad (9)$$

Зависимость изменения индуктивного сопротивления рассеяния обмотки возбуждения в функции тока рассчитывалась по (4). При этом использовались аппроксимирующие выражения (8) и (9), характеризующие зависимости от тока индуктивных сопротивлений $x_{\sigma}(I)$ и $x'_f(I)$ соответственно. Полученная зависимость также представлялась экспоненциальной функцией вида

$$x_{\sigma f}(I) = 0,108 \cdot e^{-0,117 \cdot I} \quad (10)$$

Графическое представление зависимости (10) показано на рис. 3.

Анализ полученных экспериментальных зависимостей свидетельствует о том, что при увеличении тока от 0,5 о.е. до 2,5 о.е. переходное сопротивление в опытах восстановления напряжения снижается в 1,155 раза. Индуктивное сопротивление, измеренное со стороны обмотки возбуждения при короткозамкнутом состоянии обмотки статора x'_f в опытах га-

шения электромагнитного поля, при этом уменьшается в большей степени. Отличие составляет 1,36 раза. Индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора уменьшаются в исследуемом диапазоне увеличения степени насыщения в 1,68 и 1,26 раза соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии насыщения путей магнитных потоков рассеяния на значения электромагнитных параметров исследуемого синхронного генератора.

Рассмотрим влияние насыщения на частотные характеристики (токовые диаграммы), представляющие собою проводимость, измеренную со стороны обмотки статора.

Рассчитанные по (6) частотные характеристики по продольной оси ротора генератора типа СГ-18,75 для значений тока 0,5; 1,5; и 2,5 о.е., приведены на рис. 4 (кривые 1, 2 и 3 соответственно).

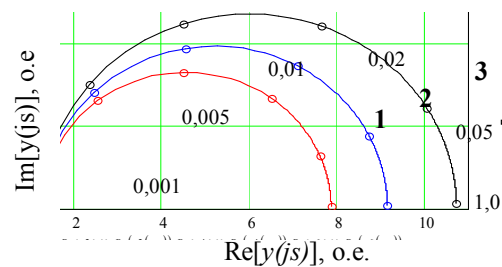


Рисунок 4. Частотные характеристики $y_d(js)$ СГ типа СГ-18,75 (ось d)

Из анализа приведенных частотных характеристик видно, что влияние насыщения в различной степени проявляется для различных диапазонов скольжения или частоты тока в роторе. В области малых величин скольжения от 0 до 0,005 о.е. увеличение амплитудного значения проводимости не превышает 10%. В диапазоне больших скольжений это влияние становится значительнее. Так при $s = 1$ увеличение периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания достигает в рассматриваемом диапазоне изменения магнитного состояния машины 36 %. Полученное семейство ЧХ проводимости со стороны обмотки статора СМ можно использовать для математического моделирования электромагнитных переходных процессов при внезапных трехфазных КЗ с учетом влияния насыщения. Для аналитического описания указанных ЧХ более эффективно использование параметров эквивалентной схемы замещения Γ – образного типа (рис.1б) [10].

Определение эквивалентного индуктивного сопротивления, отражающего влияние контура обмотки возбуждения x'_f такой схемы может быть выполнено по следующему соотношению

$$x_f = \frac{Re[y_f(js)]}{Mod^2[y_f(js)]} \quad (11)$$

$$\text{где } y_f(js) = y_d(js) - \frac{1}{x_{ad} + x_{\sigma}(I)}$$

Рассчитанная таким образом зависимость приве-

дена на рис.3. Она описывается аналитическим соотношением экспоненциального вида:

$$x_f(I) = 0,165 \cdot e^{-0,177 \cdot I} \quad (12)$$

На рис.5 представлены частотные характеристики коэффициента распределения тока КЗ статора в цепи обмотки возбуждения, рассчитанные по параметрам Т – образной схемы замещения по следующему соотношению

$$C_f(j\omega) = \frac{j\omega \cdot x_{ad}}{j\omega(x_{ad} + x_{\sigma f}(I)) + r_f} \quad (13)$$

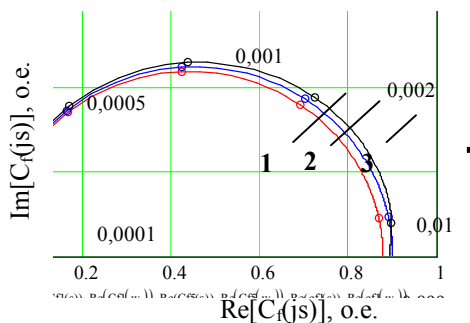


Рисунок 5. Частотные характеристики $C_f(j\omega)$

На рис.5 кривая 1 получена при значениях тока статора 0,5 о.е., а кривая 2 – 2,0 о.е. Сопоставление частотных характеристик $C_f(j\omega)$, полученных при различных магнитных состояниях электрической машины указывает на незначительное влияние насыщения на токораспределение. Увеличение действительной составляющей характеристики не превышает 2,4 % во всей области значений скольжений. Отличие мнимых частей при этом не превышает 4,9%.

Экспериментальным путем по данным регистрации токов в обмотках статора и возбуждения при внезапном трехфазном КЗ в соответствии с методикой, изложенной в [10], была определена частотная характеристика комплексного коэффициента $C_f(j\omega)$. Опыт проводился из режима холостого хода при исходном напряжении, при котором начальное значение периодической составляющей тока КЗ составило примерно 2,0 о.е. Опытная зависимость приведена на рис.5 (кривая 3). Сопоставление с рассчитанной по параметрам схемы замещения характеристикой указывает на их практическое совпадение в диапазоне скольжений от 0 до 0.01 о.е. В области больших скольжений отличия по модулю и действительным составляющим не превышает 3,7%.

Отличия мнимых составляющих увеличиваются в большей степени и при скольжении 1,0 о.е. достигают 30 %. Однако сами значения при этом уменьшаются на три порядка.

Выводы.

1. Предложена методика определения по данным опытов обычных промышленных испытаний, регламентируемых ГОСТ 10169-77, параметров схемы замещения СМ без демпферных обмоток, отражающих явление магнитного насыщения путей потоков рассеяния по продольной оси.

2. Получены зависимости индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток статора и возбуждения в функции токов для синхронного генератора типа СГ-18,75.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казовский Е.Я., Рубисов Г.В. Переходные процессы в синхронных машинах при аномальных режимах в энергосистеме. – СПб.: Наука, 1994. – 172 с.
2. Герасимов С.Е., Соловьев С.Л. Влияние насыщения турбогенераторов на токи короткого замыкания // Установившиеся и переходные режимы работы электрических систем: Тр. ЛПИ. – Л. - 1982. - № 385. – С. 44-47.
3. Rogozin G.G., Larina I.I. Об использовании функциональных характеристик при учете влияния насыщения синхронных машин // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1986. - №6. – С.61-68.
4. Rogozin G.G., Larin A.M., Larina I.I. Определение зависимости параметров эквивалентного демпферного контура турбогенератора от начального значения тока короткого замыкания // Электротехника. – 1999. - №12. – С. 14-17.
5. Galbay M.M., Miklyayev M.S., Sidelnikov A.V. Влияние насыщения на частотные характеристики и переходные реактивности синхронных машин // Электротехника. – 1982. - №9. – С. 44-47.
6. Rogozin G.G. Determining the electromagnetic parameters of AC machines // Revu general de l'electricite. – 1993. – N9. – P. 8-16.
7. Kazuo Shima, Kazumasa Ide, Miyoshi Takahashi. Analysis of magnetic saturation in a salient-pole synchronous machine after sudden three-phase short circuit // Electrical Engineering in Japan, v 145, n 4.- December. - 2003. - P. 46-55.
8. ГОСТ 10169-77. Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 73 с.
9. Rogozin G.G., Larin A.M. Влияние величины апериодической составляющей тока короткого замыкания на значения переходного индуктивного сопротивления синхронной машины // Наукові праці ДонДТУ, серія Електротехніка і енергетика, вип.28. Донецьк, 2001. – С. 114-118.
10. Larin A.M., Tkachenko A.A., Larina I.I. Определение электромагнитных параметров обмотки возбуждения синхронного генератора из опытов внезапного трехфазного короткого замыкания // Электротехніка і Електромеханіка.– 2005.- №2. – С.52-58.