

УДК 621.311-52:681.3

И.П. Заболотный

Донецкий национальный технический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ ГЕНЕРАТОРА С ПОМОЩЬЮ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ

© Заболотный И.П., 2003

Проаналізовано параметри режимів при внутрішніх коротких замиканнях у генераторі, розроблено критерії діагностики пошкоджень.

The analysis of parameters of conditions is carried out at interior short-circuits in the generator, the measure of diagnostics of damages designed.

Постановка задачи. Надежность работы систем электроснабжения зависит от надежности работы электрооборудования, тем более, что значительная часть оборудования либо отработала определенный стандартом минимальный срок службы, либо срок его эксплуатации приближается к этому показателю, а техническое перевооружение в энергосистемах Украины в силу сложившихся условий идет крайне медленно. Понятно, насколько актуальной в подобных условиях оказывается задача эффективной диагностики.

Работа в этой области началась с формирования основных, достаточно очевидных, принципов: максимальное использование возможностей современных средств вычислительной техники; реализация концепции экспертных систем; применение наиболее эффективных традиционных испытаний и методов оценки состояния объектов. С учетом вышеизложенного автором статьи было разработано инструментальное программное обеспечение для создания инженерами – электриками прикладных экспертных систем. Для создания системы диагностики необходимо разработать критерии оценки состояния оборудования, описать множества причинно-следственных зависимостей в виде деревьев ситуаций и реализовать их с помощью интерфейса в создаваемой прикладной системе диагностики. Так, например, в базе знаний экспертной системы диагностики генераторов отражены ситуации, связанные с повышением и понижением температуры холодного водорода, уменьшением или увеличением тока ротора и статора, изменения перепада давления «масло-водород» на уплотнениях генератора, повышении температуры активных частей генератора и др. В ряде ситуаций базы знаний экспертной системы диагностики генератора предусмотрены ветви и узлы, связанные с анализом процессов внутренних коротких замыканий генератора. Межвитковые и междуфазные короткие замыкания в обмотке статора генератора относятся к самым тяжелым случаям повреждений, которые, возникая в электрической системе, могут нарушать режим работы турбоагрегата. Повреждение витковой изоляции обмотки возбуждения является одним из наиболее распространенных видов неисправностей турбогенераторов. В случае одновитковых коротких замыканий дефект практически не обнаруживает себя в изменениях отдельных режимных параметров генератора, однако развитие повреждения может приводить к тепловым перекосам в роторе и, как следствие, к недопустимым вибрациям валопровода энергоблока.

Анализу внутренних коротких замыканий в обмотке статора посвящен ряд работ [1-4], направленных на разработку методов определения собственных и взаимных

сопротивлений здоровых и поврежденных частей обмотки и формирование систем уравнений. Однако, эти работы не рассматривают вопросы диагностирования внутренних замыканий в обмотке статора.

Вопросы диагностирования нарушения состояния витковой изоляции обмотки возбуждения турбогенераторов рассмотрены в [3, 5–7]. Однако, методы не учитывают изменение насыщения магнитной цепи вследствие изменения потока рассеяния ротора с изменением нагрузки, которое оказывает, согласно [8] существенно влияет на рабочие характеристики машины. Кроме того, концепция диагностики отдельных ситуаций является не эффективной.

В данной работе ставится задача обобщения математической модели внутренних повреждений генератора и выполненных исследований и разработки критериев диагностики внутренних повреждений генератора для последующей их реализации в базе знаний экспертной системы диагностики генератора. Следует отметить, что развитие базы знаний прикладной экспертной системы не требует изменения программных кодов инструментальных программных средств диагностики.

Математическая модель несимметричной машины. Математическая модель должна отразить конструктивное исполнение и случайное появление внутреннего повреждения, а также возможность уточнения описания физических явлений в машине переменного тока. Этим требованиям отвечает математическая модель, приведенная в [4], в которой отдельный виток рассматривается в качестве электрического и магнитного основного структурного элемента. При этом принимается, что машина имеет n ветвей в статоре и k ветвей в роторе, причем каждая ветвь состоит из одного витка. Совместное включение отдельных витков сначала в катушки и ветви, а затем в схему звезды или треугольника полностью описывается с помощью матриц коэффициентов. При составлении матрицы индуктивных сопротивлений предполагается, что обмотка возбуждения и демпферная обмотка по продольной оси обладают магнитной связью с демпферной обмоткой продольной оси в отличие от теории Парка и Горева.

Уравнение напряжения отдельной фазы имеет вид:

$$[U] = [C][U^s],$$

где $[U]$ – матрица фазных напряжений; $[U^s]$ – матрица витковых напряжений; $[C]$ – матрица фазных коэффициентов.

Схема соединения отображается матричными уравнениями:

$$[U_j] = [B][U] + [U_K^s] + [U_0], \quad [i] = [D][i_j],$$

где j — фазы a, b, c; $[U_K^s]$, $[U_0]$ – падения напряжения на ветви короткого замыкания и в нулевом проводе в случае заземления нейтрали звезды обмотки статора; $[B]$, $[D]$ – коэффициенты, отражающие схему соединений.

Параметры несимметричной машины определяется на основе расчета магнитных полей в электрической машине, что является трудоемкой задачей. Поэтому математическую модель [4] рекомендуется использовать как эталонную, а в качестве рабочей модели использовать выражения для расчета индуктивных сопротивлений из [1] и уравнения Парка-Горева. Обе модели дополнены соотношениями для учета насыщения по пути основного магнитного потока.

Математическая модель для исследования замыканий в обмотке возбуждения представляет собой уравнения Парка-Горева, записанные для приращений. Короткозамкну-

тый виток обмотки возбуждения рассматривается как демпферный контур с параметрами, для расчета которых получены приведенные ниже выражения.

Активное сопротивление короткозамкнутого витка и оставшейся части обмотки возбуждения:

$$r_{f\kappa\kappa} = r_f \frac{\omega_{f\kappa\kappa}}{\omega_{ff}} = r_f \frac{1}{\omega - 1}, \quad r_{ff} = r_f - r_{f\kappa\kappa}.$$

Индуктивные сопротивления:

$$L_{ff} = x_{of} \left(\frac{\frac{w_f}{2p} - 1}{\frac{w_f}{2p}} \right)^2, \quad x_{f\kappa\kappa} = L_{f\kappa\kappa} = x_{of} \frac{\omega_{f\kappa\kappa}^2}{\omega_f \cdot Sn}, \quad M_{ff1d} = x_{ad} \frac{w_f - 1}{w_f}, \quad M_{f\kappa\kappa1d} = x_{ad} \frac{w_{f\kappa\kappa}}{w_f} = x_{ad} \frac{1}{w_f},$$

$$M_{ff f\kappa\kappa} = x_{ad} \frac{w_{ff}}{w_f} \cdot \frac{w_{f\kappa\kappa}}{w_f} = x_{ad} \frac{w_f - 1}{w_f^2} \cdot w_{f\kappa\kappa},$$

В выражениях используются стандартные обозначения теории электрических машин.

Критерии диагностики. Критерий диагностики состояния изоляции ротора в установившемся режиме работы генератора связан с контролем тока в обмотке возбуждения, так как появление витковых замыканий сопровождается ростом тока в обмотке возбуждения при уменьшении относительного значения реактивной мощности из-за ослабления эффективного значения магнитного поля генератора

$$(i_f^{ИЗМ} - i_f^{PAC}) > \frac{i_f^{PAC}}{w_f} \wedge u_f = \text{const} \wedge u_f/i_f \leq r_f^{105} \quad (1)$$

при выполнении следующих условий: при текущем измерении не менялось напряжение источника возбуждения, не включался контактор самосинхронизации, не работал разрядник, исправны схемы измерения, где $i_f^{PAC} = \varphi(P, Q, u)$ – расчетное значение тока в обмотке возбуждения по параметрам текущего режима с учетом насыщения по методике [8]; $i_f^{ИЗМ}$ – измеренное (фактическое значение тока возбуждения); P – активная мощность; Q – реактивная мощность; u – напряжение на выводах генератора; w_f – номинальное число витков обмотки возбуждения; u_f и i_f – измеренные напряжение источника возбуждения и ток в обмотке возбуждения; r_f^{105} – активное сопротивление обмотки возбуждения при 105 °С.

Уточнение появления короткозамкнутых витков в обмотке ротора, выявленных по данным измерений в установившемся режиме работы генератора, выполняется путем подачи импульсного воздействия на дополнительный вход АРВ генератора. При оценке состояния изоляции используется значение внутримножественного расстояния регистрируемого тока в обмотке возбуждения

$$D = \sum_{k=1}^n (i_{f \max} - i_f(t_k))^2,$$

где $i_{f \max}$ – максимальное значение тока в обмотке возбуждения в процессе изменения; $i_f(t_k)$ – значение тока для текущего момента времени; n – число регистрируемых значений тока возбуждения.

На рис. 1 представлена зависимость отклонений значений внутримножественного расстояния тока возбуждения при наличии короткозамкнутых витков в обмотке возбужде-

ния по отношению к значению внутримножественного расстояния тока в обмотке возбуждения при отсутствии повреждений от числа короткозамкнутых витков в роторе (W_{K3}) для генератора мощностью 300 МВт. Значения тока возбуждения получены расчетным путем на основе моделирования режима, возникающего при подаче импульсного возмущения на вход АРВ генератора мощностью 300 МВт при его работе с номинальной нагрузкой. Как следует из рис. 1 минимальное различие в $\delta D(W_{K3})$ составляет около 2 %.

В работе выполнено влияние изменения сопротивления взаимоиндукции и активного сопротивления обмотки ротора на отклонение тока при возмущении и, как следствие, на зависимость $D(W_{K3})$. Установлено, что чувствительность D к изменению сопротивления взаимоиндукции выше, что изменение X_{ad} , r_f приводит к изменению зависимости значений внутримножественного расстояния от числа витков вида:

$$D_{Xad}(W_{K3}) = K_{Xad} * D(W_{K3}), D_{rf}(W_{K3}) = K_{rf} * D(W_{K3}),$$

где K_{Xad} , K_{rf} – коэффициенты пропорциональности.

Пределы изменения сопротивления взаимоиндукции принимались при моделировании исходя из расчетов по влиянию исходного режима генератора на значение индуктивности по [8].

Основные положения методики для диагностического контроля состояния изоляции ротора:

1. Подготовительный этап

1.1. Измерение параметров установившегося (исходного) режима.

1.2. Расчет сопротивления взаимоиндукции и активного сопротивления обмотки возбуждения для условий исходного режима.

1.3. Регистрация тока возбуждения при импульсном возмущении и определение значения внутримножественного расстояния $Dэ$.

2. Непрерывный контроль состояния изоляции ротора экспертной системой.

2.1. Периодическая регистрация параметров текущего режима.

2.2. Расчет тока в обмотке возбуждения с учетом [8].

2.3. Проверка выполнения критерия (1). При выполнении критерия выполняется переход к пункту 3, в противном случае к пункту 2.

3. Уточняется заключение о наличии короткозамкнутых витков в обмотке возбуждения.

3.1. Выполняется импульсное возмущение через дополнительный вход АРВ генератора.

3.2. Регистрируется изменение тока в обмотке возбуждения и определяется текущее значение внутримножественного значения D .

3.3. Определяют значения коэффициентов K_{Xad} , K_{rf} по данным значений X_{ad} и r_f , полученным в пунктах 1 и 2.

3.4. Сравнивается уточненное текущее значение D со значением $Dэ$. Если $D > Dэ$, то факт наличия короткозамкнутых витков в роторе подтверждается.

Анализ процессов при повреждении обмотки статора генератора мощностью 200 МВт позволил сформулировать следующее:

1. Токи короткого замыкания в неповрежденной части в фазе при замыкании одного витка достигают значения $3,5 I_{ном}$, а при междуфазных замыканиях 2–3 витков $2,3 I_{ном}$.

2. Напряжения фаз, когда в них замыкаются накоротко витки, снижаются в большей степени по сравнению с напряжениями фаз, в которых нет повреждений обмотки.

3. Короткие замыкания немногих витков, междуфазные замыкания с близкими к нейтральной точке участками обмотки приводят к сравнительно небольшому повышению электромагнитного момента.

4. Сверхпереходные токи после возникновения короткозамкнутого витка практически не зависят от положения витка в фазе. При возникновении виткового короткого замыкания при различном его расположении в фазе А сверхпереходные токи в фазах примерно одинаковы и находятся в пределах от 1,5 до 3,5 номинального тока статора генератора. Токи в фазах В и С имеют более близкие значения, ток поврежденной фазы несколько больше

Если $i_A'' > i_B'' \approx i_C'' \wedge 1,5I_{НОМ} < i_A'' < 3,5I_{НОМ} \Rightarrow$ «Замыкание витка в фазе А».

Величина всплеска свободного тока в роторе пропорциональна сверхпереходной составляющей тока в статоре и доле короткозамкнутых витков в фазе.

5. С увеличением количества короткозамкнутых витков сверхпереходный ток в одной из неповрежденных фаз остается практически постоянным в окрестности $2I_{НОМ}$, ток в двух других фазах растет пропорционально количеству замкнутых витков

Если $i_1'' \approx 2I_{НОМ} \wedge i_1'' < (i_2'' \approx i_3'') \wedge i_2'' \approx k * w * I_{НОМ} \Rightarrow$ «в фазе короткозамкнуто несколько витков», где k – коэффициент пропорциональности, w – приближенное количество замкнутых витков фазы».

6. Максимальное значение электромагнитного момента и время изменения знака электромагнитного момента, амплитудное значение тока возбуждения и время интенсивного роста тока зависят от места и вида повреждения. На рис. 2 приведены схемы коммутации, для которых приведены зависимости на рис. 3–4.

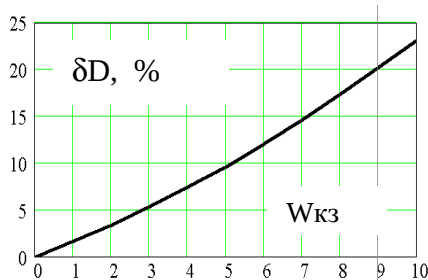


Рис. 1.

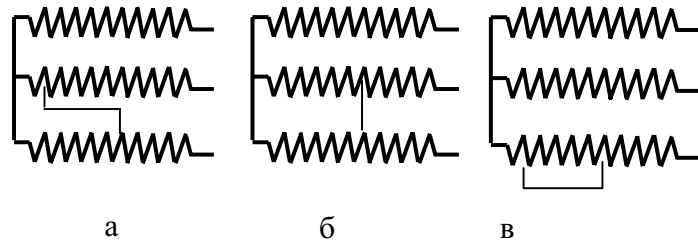


Рис. 2. Схемы коммутации

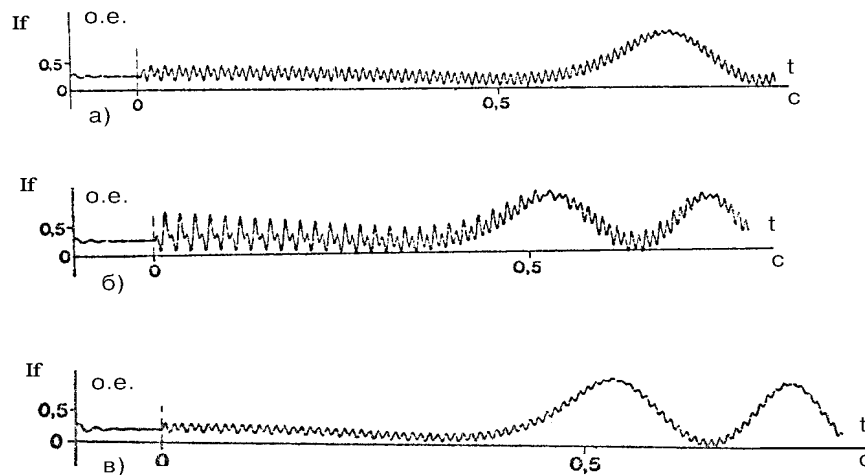


Рис. 3. Ток возбуждения при повреждениях согласно схеме коммутации (рис. 2)

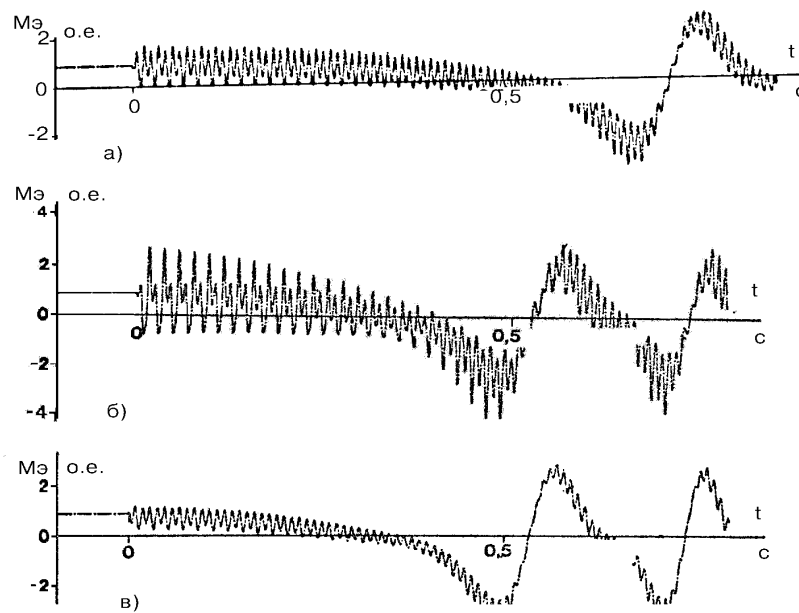


Рис. 4. Электромагнитный момент при повреждениях согласно схеме коммутации (рис. 2)

Использование значений тока возбуждения и электромагнитного момента для расчета при характерных повреждениях позволяет сформировать эталоны классов для диагностики и записать следующие логические выражения:

если $(i_f < i_{f1} \wedge t > t_1) \wedge (M_{\mathcal{E}} < M_{\mathcal{E}1} \wedge t > t_2) \Rightarrow$ «межфазное замыкание при расположении точки замыкания в одной из фаз вблизи нейтрали;

если $(i_f > i_{f1} \wedge t < t_1) \wedge (M_{\mathcal{E}} > M_{\mathcal{E}1} \wedge t < t_2) \Rightarrow$ «межфазное замыкание с несколькими витками в фазах»;

если $(i_f < i_{f1} \wedge t < t_1) \wedge (M_{\mathcal{E}} < M_{\mathcal{E}1} \wedge t < t_2) \Rightarrow$ «короткозамкнутые витки в фазе».

7. При межфазных коротких замыканиях между двумя фазами сверхпереходные токи в фазах не равны и растут по амплитуде с увеличением количества замкнутых витков.

8. Величина всплеска свободного тока в роторе при одной и той же доле короткозамкнутых витков в фазе статора и в двух фазах статора примерно вдвое выше.

9. Короткие замыкания в лобовой части обмотки чаще приводят к междуфазным коротким замыканиям, короткие замыкания в пазе чаще являются коротким замыканием одного витка.

10. Затруднительно различить замыкание одного витка фазы, междуфазные замыкания витков вблизи нейтрали, междуфазные короткие замыкания между двумя фазами при смещении короткозамкнутой точки в одной фазе от нейтральной точки и витковые замыкания в фазе при различном количестве короткозамкнутых витков

Значения коэффициентов в логических выражениях уточняются по результатам моделирования для конкретного генератора.

На основании сформированных заключений строятся правила для базы знаний экспертной системы.

Выводы. 1. Предложены критерии для диагностики внутренних коротких замыканий генератора, которые расширяют функциональные возможности экспертной системы диагностики.

2. Обобщенная методика определения замкнутых витков обмотки возбуждения позволяет реализовать непрерывный контроль состояния изоляции ротора генератора.

3. Целесообразно продолжить теоретический анализ диагностики повреждений обмотки статора в направлении оценки влияния насыщения магнитной системы на диагностические сигналы.

1. Казовский Е.Я., Данилевич Я.Б., Кашарский Э.Г., Рубисов Г.В. *Аномальные режимы работы крупных синхронных машин.* – Л., 1968. – 429 с. 2. Домбровский В.В. *Внутренние короткие замыкания в обмотке статора двухполюсного турбогенератора // Изв. вузов. Электромеханика.* – 1962. – № 9. – С. 24–27. 3. Глебов И.А., Данилевич Я.Б. *Диагностика турбогенераторов.* – Л., 1989. – 119 с. 4. Kulig C. *Über die Beeinflussung der Ströme und des elektromagnetischen Drehmomentes von Turbogeneratoren durch Windungs- und Phasenschlüsse* – Universität Haannover. – 1979. – 161 s. 5. Езовит Г.П., Хлебинский И.В. *Способ контроля витковых замыканий обмотки ротора синхронной машины. Авт.свид. SU № 1436077 A1 G 01 R 31/34.* 6. Li Yonggang et al. *A new method of inter turn short-circuit fault diagnose of steam turbine generator rotor windings.* 15th International Conference on Electrical Machines (ICEM-2002) Book of Abstracts, p. 372. 7. Vilaragut M. et al. *Diagnostic of Turbogenerator Rotor Short-circuit Turns Utilizing Artificial Neural Networks* 15th International Conference on Electrical Machines (ICEM-2002) Book of Abstracts, p. 392. 8. Казовский Е.Я., Шмони́на Л.И. *Влияние насыщения магнитной цепи на рабочие характеристики мощных турбогенераторов // Электротехника.* – 1975. – № 10. – С. 5–8.