

ДИАГНОСТИКА БАНДАЖНЫХ КОЛЕЦ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Рогозин Г.Г., Ковязин В.А.

Донецкий государственный технический университет

rgg@elf.dgtu.donetsk.ua

The research work is devoted to improving the performance reliability of turbogenerators using the eddy-currents being induced by means of the impulse test signal in the solid constructional elements of the rotor for diagnosing its mechanically conjugated end bells. The paper presents the results of experimental research of the turbogenerator rated value 241,3 MVA carried out at the turbogenerator factory.

Введение. К числу важнейших задач энергетического комплекса следует отнести совершенствование существующих и создание новых эффективных методов и средств диагностирования состояния крупных электрических машин, в частности турбогенераторов. При этом особенно важное значение имеет совершенствование систем управления качеством производства турбогенераторов на заводах изготовителях. Актуальное значение приобретает также проблема контроля состояния непроводниковых узлов ротора. Известно, что невыявленные дефекты сборки последнего, обусловленные отклонениями в технологии производства, а также дефекты, получившие развитие в процессе эксплуатации машины (усталостные трещины и коррозионное растрескивание бандажных колец; оплавление отдельных участков путей протекания вихревых токов по поверхности ротора, как следствие асинхронных режимов турбогенераторов или несинхронных включений линий; изменение натяга посадочных мест бандажных узлов и др.), могут приводить к тяжелым авариям [1].

Как известно, Électricité de France и фирма Alstom Atlantic разработали ультразвуковой метод контроля состояния бандажей без выемки ротора из расточки статора [2]. Обладая рядом достоинств по выявлению дефектов, указанное обследование, требующее применения сложной дорогостоящей аппаратуры, является весьма трудоёмким, поскольку на его проведение, связанное с необходимостью останова ротора и съёма верхних половин торцовых щитов машины затрачивается значительное время.

В настоящей работе рассматривается задача обнаружения дефектов бандажных колец по изменению контактного давления их посадочных поверхностей, исключая приведенные выше недостатки.

Идея предлагаемого экспресс-метода, контролирующего состояние бандажных колец ротора, базируется на подаче в обмотку возбуждения тестового сигнала в виде импульсного воздействия и анализе диагностического сигнала, отражающего характер изменения переходной функции вихревых токов в массивных элементах конструкции ротора (ЭКР) турбогенератора. Теоретическое обоснование импульсного метода и методика его проведения рассматривалась в [3, 4], а вопросы применения импульсного метода для исследования электромагнитных характеристик демпферной системы турбогенератора – в работе [5]. Исследование оптимальных условий проведения эксперимента выполнялось в [6] с учетом физических явлений электромагнитного характера, поясняемых с помощью рис. 1.

Экспериментальное исследование, проведенное при сборке ротора турбогенератора ТГВ-200М в условиях завода «Электротяжмаш» (г. Харьков), включало в себя анализ результатов измерения импульсных переходных функций ЭКР турбогенератора, полученных при подаче рассмотренного на рис. 1. воздействия на кольца ротора в процессе его пооперационной сборки, а также при вращающемся с различной частотой роторе машины.

Измеренные на кольцах ротора значения ЭДС взаимной индукции пропорциональные производной переходной функции вихревых токов в ЭКР, наведенных импульсным воздействием в обмотке ротора, в процессе обработки диагностического сигнала аппроксимировались суммой экспоненциальных составляющих:

$$u_f(t) = \sum_{k=1}^n u_{fk} \exp(-\alpha_{Dk}t),$$

где u_{fk} , α_{Dk} – начальное значение и коэффициент затухания k -той экспоненциальной составляющей.

Аппроксимация осуществлялась при следующих допущениях:

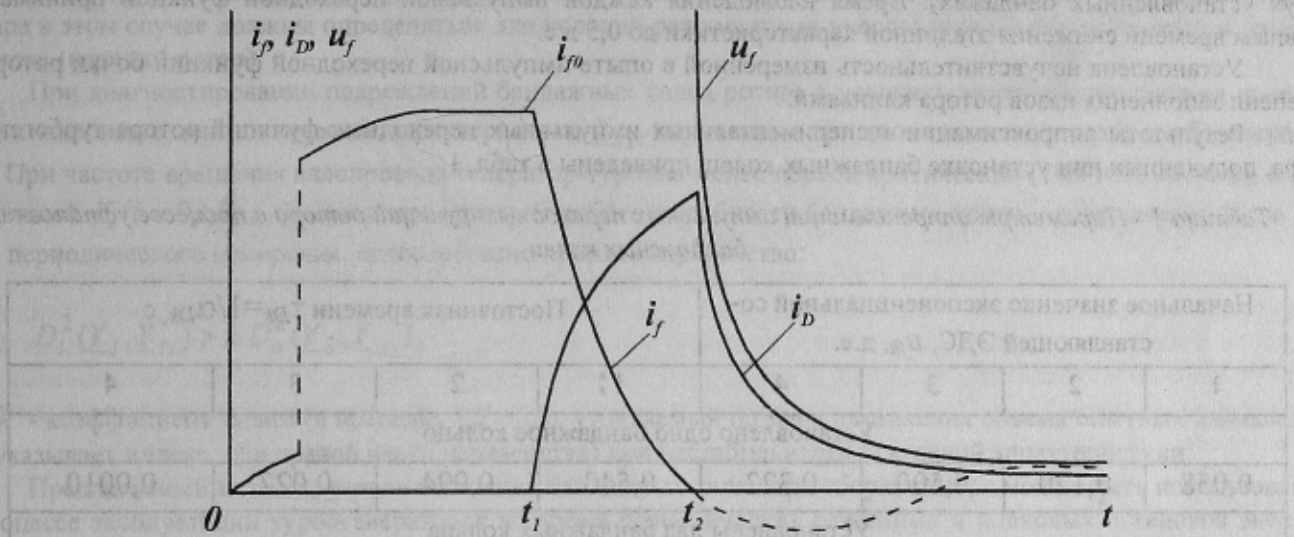
- переходная функция токов в массивных ЭКР может быть представлена в виде реакции системы четвертого порядка;

- ординаты переходной функции после снижения сигнала до 0,2 – 0,3 начального значения принадлежат одной экспоненте, имеющей наибольшую постоянную времени.

При этом выполнялось условие минимизации среднеквадратичного отклонения аналитического представления импульсной переходной функции от замеров последней в интервале равном примерно двум постоянным времени наиболее быстро затухающих составляющих. Начальные значения ЭДС U_i , регистрируемые через каждые 100 мкс с помощью автоматизированного комплекса средств измерений, содержащего 10 – ти разрядный АЦП, нормировались исходя из условия:

$$\sum_{i=1}^n U_i = 1.$$

Анализ импульсных переходных функций включал в себя, в качестве меры сходства образов состояния бандажных колец, меры евклидова и внутримножественного расстояний [7].



$0 - t_1$ — подъем тока возбуждения от источника постоянного тока малой мощности; $0 - t_2$ — формирование входного импульсного воздействия; $t_1 - t_2$ — гашение магнитного поля ротора с помощью конденсатора; $t_2 - t_\infty$ — свободное изменение вихревых токов в массиве ротора.

Рисунок 1 — Характер изменения токов в роторе и электродвижущей силы на выводах обмотки возбуждения турбогенератора.

Евклидово расстояние определялось по формуле:

$$D^2(\underline{Y}, \underline{Y}_3) = \|\underline{Y} - \underline{Y}_3\|^2 = \underline{Y}^T \underline{Y} - \underline{Y}^T \underline{Y}_3 - \underline{Y}_3^T \underline{Y} + \underline{Y}_3^T \underline{Y}_3,$$

где $\underline{Y}_3, \underline{Y}$ — матрицы эталонного образа ЭКР и измеряемого в процессе проведения периодического контроля, представляемые в виде совокупности признаков в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_n ;

$$\underline{Y}_3 = \begin{bmatrix} Y_{13} \\ Y_{23} \\ \vdots \\ Y_{n3} \end{bmatrix}, \quad \underline{Y} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix},$$

T — символ транспонирования.

Внутримножественное расстояние между точкой соответствующей образу x и множеством точек соответствующих образам $\{a^i\}$, представляющих класс K образов, как известно, определяется как среднее квадратичное расстояние между x и K элементами множества $\{a^i\}$. Квадрат расстояния между точками x и a^i равен:

$$D^2(\{Y^j\}, \{Y^i\}) = \sum_{k=1}^n (Y_k^j - Y_k^i)^2,$$

где $i, j = 1, 2, \dots, k-1; i \neq j$.

В рассматриваемом случае в качестве фиксированных точек принимались начальное и текущие значения импульсной переходной функции, тогда:

$$D^2(Y,1) = \sum_{k=1}^n (1 - Y_k)^2$$

Регистрация диагностического сигнала проводилась в процессе сборки ротора на этапах проведения технологических операций по монтажу клиновой системы, после установки первого бандажа (расположенного со стороны противоположной кольцам ротора) и после установки второго бандажа. При выполнении технологической операции по установке бандажных колец в качестве эталонного образца был принят ротор в сборе (при двух установленных бандажах). Время наблюдения каждой импульсной переходной функции принималось равным времени снижения эталонной характеристики до 0,5 д.е.

Установлена нечувствительность измеренной в опыте импульсной переходной функции бочки ротора от степени заполнения пазов ротора клиньями.

Результаты аппроксимации экспериментальных импульсных переходных функций ротора турбогенератора, полученных при установке бандажных колец, приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Параметры аппроксимации импульсных переходных функций ротора в процессе установки бандажных колец

Начальное значение экспоненциальной составляющей ЭДС, U_{jk} , д.е.				Постоянная времени $\tau_{Dk}=1/\alpha_{Dk}$, с			
1	2	3	4	1	2	3	4
Установлено одно бандажное кольцо							
0,058	0,120	0,500	0,322	0,540	0,094	0,022	0,0010
Установлены два бандажных кольца							
0,105	0,290	0,605	-	0,500	0,088	0,022	-

Из анализа приведенных данных следует, что установка второго кольца приводит к перераспределению начальных значений экспоненциальных составляющих в сторону экспонент с большими постоянными времени и исключению в диагностическом сигнале быстрозатухающей составляющей измеряемой ЭДС. Изменение постоянных времени первых трех (по порядку разложения) экспонент практически не наблюдается.

Полученные в результате испытаний ротора импульсные переходные функции при их совпадении с данными последующих испытаний ряда объектов того же типоразмера могут быть приняты в качестве эталонных характеристик образов состояния объекта. Различие в характеристиках (при идентичности свойств используемых материалов, качества обработки поверхностей ЭКР и допустимых отклонений от заданного класса точности изготовления последних) дает основание утверждать о неудовлетворительной посадке бандажных колец.

Испытания ротора на угонную скорость проводились при вращении ротора с частотой 1000, 2000 и 3000 об/мин. В качестве эталонного образа была принята импульсная переходная функция ротора, вращающегося с частотой 1000 об/мин. Результаты расчета евклидовых расстояний, классифицирующих образы переходных функций вращающегося ротора приведены в табл. 2.

Таблица 2 - Классификация образов импульсных переходных функций

Частота вращения ротора ($\omega_r = 1000$ об/мин.)	Интервал наблюдения импульсных переходных функций, с $\tau_2 = 0,078$ с, $\tau_3 = 0,016$ с	
	$0 < t < 2\tau_3$	$2\tau_3 < t < 2\tau_2$
2000	0,081	1,20
3000	0,132	1,20

Как следует из приведенных данных, значение евклидова расстояния между переходными функциями во временном интервале от 0 до $2\tau_3$ является наиболее информативным о состоянии бандажных колец. Евклидовы расстояния, рассчитанные в интервале с большими постоянными времени не зависят от частоты вращения ротора турбогенератора и, следовательно, не обладают информативностью.

Приведенное изменение меры сходства образов состояния бандажных колец может быть объяснено перераспределением путей протекания вихревых токов при росте частоты вращения ротора. Как указано в [8] подобные явления существенно зависят и от теплового состояния ротора.

Таким образом, изменение увеличения евклидова расстояния при проведении измерений импульсных переходных функций в процессе испытаний на угонную скорость на стенде завода изготовителя можно отождествлять с изменением состояния посадки бандажных колец ротора.

Значения внутримножественной меры сходства образов состояния ротора после установки одного и двух бандажных колец в диапазоне изменения импульсной переходной функции равном $0 < l < 2\tau_3$ и шаге измерения $\Delta l = 100$ мкс составили соответственно 0,232 и 0,00438. Резкое повышение показателя внутримножественного расстояния для случая одного бандажного кольца на роторе может быть объяснено размыканием контуров протекания вихревых токов, характерным для случая электромагнитной симметрии непроводниковых ЭКР. При этом, как известно, происходит существенное увеличение длины пути протекания вихревых токов за счет возникновения системы локальных контуров.

При построении диагностической матрицы контроля состояния бандажных колец в условиях эксплуатации турбогенератора следует учитывать возможные тепловые состояния ротора. Векторы эталонных образов ротора в этом случае должны определяться для условий режима пуска энергоблока (холодный ротор) и останова блока (горячий ротор).

При диагностировании повреждений бандажных колец ротора в условиях эксплуатации следует использовать эталонные диагностические характеристики Y_{l_3} , полученные при вводе в эксплуатацию турбогенераторов. При частоте вращения валопровода генератор-турбина менее первой критической (500-1000 об/мин), и номинальной $Y_l (l = 0, 1, 2, \dots)$ в качестве критерия работоспособности бандажных колец, проверяемого после l -того периодического измерения, целесообразно принять неравенство:

$$D_l^2(Y_l, Y_{l_3}) > k D_o^2(Y_o, Y_{o3}),$$

где k - коэффициент запаса (в пределах 1,2 - 1,5), уточняемый по мере накопления объема опытных данных (на это указывает индекс o в правой части неравенства) при нестабильности эталонной характеристики.

Предлагаемый метод контроля состояния бандажных колец при сборке ротора может быть использован и в процессе эксплуатации турбогенераторов во время периодических режимных и плановых остановов энергоблоков. Очевидно, что регистрация импульсных переходных функций массива ротора в этом случае исключает необходимость применения традиционного метода контроля виткового замыкания в обмотке возбуждения по данным измерения импеданса ротора.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально подтверждены результаты теоретического исследования о возможности распознавания повреждений бандажных колец ротора при использовании переходных функций токов в массивных ЭКР.
2. Предложены эффективные диагностические показатели состояния бандажных колец ротора турбогенератора в условиях его производства и эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глебов И. А., Данилевич Я. Б. Диагностика турбогенераторов. - Л.: Наука. 1989. - 119 с.
2. Grange, B. & Lehuen, C. In situ ultra sonic inspection of turbogenerator rotor end bells. CIGRE, Report 11-10 (1986).
3. Rogozin G. G. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока. Новые экспериментальные методы. - Киев: Техника, 1992. - 168 с.
4. Rogozin G. G. Determining the electromagnetic parameters of AC machines // Revue generale de l'Electricite. - 1993. - N 9. - p. 8 - 16.
5. Rogozin G. G., Печуркин Ю. И. Применение импульсного метода для определения электромагнитных параметров массивных конструктивных элементов ротора турбогенератора // Электротехника. - 1992. N 6-7. с. 16 - 21.
6. Rogozin G. G., Ковязин В. А., Пятлина Н. Г. Моделирование переходного процесса в массивном роторе турбогенератора при подаче видеоимпульса / Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: Электротехника и энергетика, выпуск 4: Донецк: ДонГТУ, 1999. - 262 с.
7. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. - М.: Мир, 1978. - 411 с.
8. Брынский Е. А., Глазенко А. В. Термоупругие деформации бандажных узлов роторов мощных турбогенераторов / Исследования и разработки генераторов для перспективных электростанций. - Л.: ВНИИЭлектромаш, 1987. - с. 130 - 139.