

**Д.В. Кукис, Т.Г. Климова, Я.Е. Тепикин, И.С. Резников,
А.М. Балабанов**
НИУ «МЭИ»
Москва, Россия

АЛГОРИТМ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПО ДАННЫМ УСВИ

***Аннотация.** В работе рассмотрен метод мониторинга синхронного генератора и предложены алгоритмы для определения параметров генераторов по данным тока и напряжения. Также представлена пространственная модель генератора.*

**D.V. Kukis, T.G. Klimova, Y.E. Tepikin, I.S. Reznikov,
A.M. Balabanov**
National Research University "MPEI"
Moscow, Russia

ALGORITHM OF SYNCHRONOUS GENERATOR CONDITION MONITORING BASED ON PMU DATA

***Abstract.** In this paper, a method of synchronous generator monitoring is considered and algorithms are proposed to determine generator parameters from current and voltage data. A spatial model of the generator is also presented.*

Введение

Одной из ключевых частей электроэнергетической системы является генератор. От его состояния напрямую зависит надёжность электроснабжения потребителей, а его непредвиденный отказ может привести к большому недоотпуску электроэнергии и, как следствие, к экономическим потерям. Необходимо снижать риск отказа генераторного оборудования, чтобы избежать этого. На состояние генератора сильно влияет срок его эксплуатации. Жизненный цикл турбогенератора по ГОСТ 533-2000 в настоящее время составляет 40 лет. Отечественная и зарубежная практика показывает, что фактический срок эксплуатации турбогенераторов зачастую существенно превышает срок, заявленный производителем. В таких обстоятельствах одной из важнейших задач становится оценка остаточного ресурса турбогенератора по результатам комплексного обследования.

В данной работе для осуществления принципа непрерывного мониторинга предполагается использовать цифровую модель генератора, параметры которого будут сравниваться с параметрами

эталонной модели в ходе эксплуатации. Любое изменение в конструктивных параметрах генератора, будь то смещение ротора или слом зубца, ведет к изменению собственных и взаимных индуктивностей обмоток генератора. Это значит, что, отслеживая фазные параметры обмоток, мы способны оценить и общее состояние машины.

На основе параметров режима, измеряемых устройствами синхронизированных векторных измерений, возможно получить значения синхронных, переходных и сверхпереходных сопротивлений по продольной и поперечной осям. Также используется пространственная модель генератора для анализа сложных процессов, происходящих в машине. На основе этих данных строится цифровой двойник, считающийся отправной точкой. Далее вследствие эксплуатации ненормальных режимов и общего старения параметры станут изменяться, что будет видно из режима. Зная, как изменились параметры генератора в $dq0$ -координатах, мы сможем оценить, как изменились амплитуды составляющих индуктивностей обмоток, что позволит нам судить о поломке или состоянии, близком к поломке.

Описание используемой модели генератора

Рассмотрим идеальный трехфазный генератор в установившемся режиме, что позволяет не рассматривать демпферные контуры. В такой машине имеется четыре замкнутых контура: фазные обмотки A , B , C и обмотка возбуждения f . Для описания машины в фазных координатах необходимо рассчитать значения собственных и взаимных индуктивностей. Допущения модели не отличаются от введенных Горевым А.А [1]. Отметим, что использование модели генератора в фазных координатах позволяет рассматривать внутренние повреждения генератора, в то время как модель в $dq0$ требует симметричности машины. В случае повреждения генератора индуктивности и взаимные индуктивности можно представить в виде:

$$\begin{aligned} L_a &= k_{wa}^2 (L_{ls} + L_A - L_B \cos(2\gamma)); \\ L_b &= k_{wb}^2 \left(L_{ls} + L_A + L_B \cos\left(2\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right); \\ L_c &= k_{wc}^2 \left(L_{ls} + L_A + L_B \cos\left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \right); \\ M_{ab} &= k_{wa} k_{wb} \left(\frac{1}{2} L_A + L_B \cos(2\gamma - \frac{2\pi}{3}) \right); \end{aligned}$$

$$M_{bc} = k_{wb}k_{wc} \left(\frac{1}{2}L_A + L_B \cos(2\gamma) \right);$$

$$M_{ac} = k_{wa}k_{wc} \left(\frac{1}{2}L_A + L_B \cos(2\gamma + 2\pi/3) \right);$$

Задача мониторинга сводится к нахождению коэффициентов L_A , L_B , L_{ls} , L_{sfd} , R_a , R_b , R_c , R_f . Задача идентификации симметричной машины на этом можно считать поставленной, однако для несимметричного повреждения стоит учесть, что параметры будут изменяться от фазы к фазе. С одной стороны, можно ограничиться введением переменных для каждой фазы, что является универсальным способом, однако требует большие вычислительные мощности. С другой стороны, можно ввести коэффициенты k_{wa} , k_{wb} , k_{wc} , k_{wf} , которые бы характеризовали количество неповрежденных витков в обмотке.

Создание пространственной модели

ANSYS Maxwell позволяет реализовать пространственную модель синхронного генератора методом конечных элементов (*Finite Element Method — FEM*) [2]. Выбор данного программного обеспечения был сделан по причине возможности моделирования развивающихся дефектов в синхронном генераторе, таких как: межвитковые замыкания, замыкания на землю и так далее.

Объектом моделирования стал генератор ТВФ-110-2ЕУЗ со следующими параметрами. Для определения параметров необходимо провести следующие опыты: определение характеристик холостого хода, определение синхронного индуктивного сопротивления по продольной оси, определение переходного индуктивного сопротивления, определение постоянных времени. В ходе выполнения опытов были проведены представленные выше опыты и вычисления на модели синхронного генератора ТВФ-110-2ЕУЗ в *Ansys Maxwell*. Были получены следующие параметры, сведенные в таблицу 1.

Таблица 1 – Параметры модели генератора

	Реактивность, о.е.		Постоянная времени, сек.		
	X_d	X'_d	T'_{d0}	T'_{d3}	T_{a3}
Реальное значение	2,037	0,271	6,7	0,89	0,41
Модель Ansys	2,03	0,1777	7,43	0,65	0,55
Погрешность, %	0,34	34,42	-10,94	27,28	-34,21

Погрешность определения достигает 34%, однако это может быть связано как с неверно снятыми данными с реальной машины, так и с ошибками в исходных данных. Так или иначе, на этом этапе нас в

большей степени интересует характер изменения величин, нежели их точное значение.

Определение параметров генератора

При мониторинге на вход программы будут поступать данные тока и напряжения с генератора. Это значит, что с заданной частотой дискретизации можно получать мгновенные значения токов и напряжений, которые дают уравнения. Для определения параметров можно использовать аналитические методы, методы оптимизации и методы машинного обучения. Аналитические методы не дают достаточной точности и применимы только для определенных режимов, к тому же по ним можно определить лишь ограниченное число параметров. Методы оптимизации позволяют искать большее число параметров в различных режимах, однако они могут найти локальный минимум, в силу чего требуется использовать дополнительные уравнения [3]. Также, для облегчения нахождения параметров генератора, можно, зная параметры холостого хода, определить L_{sfd} не составляя при этом системы линейных алгебраических уравнений.

Определим с помощью вышеописанных способов сначала L_{md} из режима холостого хода, а затем, с помощью метода оптимизации, из нагрузочного режима определим L_A , L_{ls} и L_B . Верификация работы алгоритма требует данных либо с реального оборудования, либо с математической модели. Так как требуется генерация данных в несимметричных режимах, то необходим комплекс, в котором используется модель в фазных координатах. Таким комплексом выступает ПАК *RTDS*. Для каждого генератора при определении параметров были использованы режимы холостого хода и нагрузочный режим. В данной статье рассматриваются симметричные режимы, однако дальнейшие исследования проводятся в том числе для режимов с внутренними короткими замыканиями.

Далее, с помощью перехода к паспортным параметрам генератора, описанного выше получим следующие значения:

	X_d , о.е.	X_q , о.е.	L_{ls} , о.е.
Генератор 1	2,130	1,090	0,330
Рассчитанные параметры для генератора 1	2,123	1,073	0,323
Погрешность, %	0,330	1,560	2,120
Генератор 2	1,880	1,600	0,208
Рассчитанные параметры для генератора 2	1,878	1,582	0,206
Погрешность, %	0,100	1,125	0,960

Относительная погрешность лежит в пределах 2%, что свидетельствует о достаточной точности проведенных расчетов. Точность определения параметров напрямую зависит от апериодической составляющей в токе статора: чем выше уровень апериодической составляющей, тем больше ошибка определения паспортных параметров. Особенно сильно это сказывается на синхронном сопротивлении поперечной оси.

Заключение

Предложенный в работе метод позволяет определять параметры генератора и на основе данных пространственного моделирования предупреждать о витковых замыканиях и других распространенных повреждениях. Полученные результаты соответствуют требованиям точности определения параметров, что говорит о том, что представленные алгоритмы могут быть использованы для дальнейших исследований. По мнению авторов, перспективными направлениями дальнейших исследований являются:

- уточнение методов мониторинга и диагностики генераторов и областей их применимости;
- изучение влияния различных повреждений на параметры генератора;
- уточнение перечня необходимых параметров и электрических величин для их идентификации и сравнения с математической моделью синхронного генератора.

Список использованных источников

1. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. Л.: Наука, 1985.
2. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS, учеб. пособие для студентов высших учебных заведений. М.: Академия, 2006. 288 с.
3. Тепикин Я.Е., Клинов И.В., Рафиков В.Р. и др., Определение параметров в трехконтурной модели Горева//V Международная молодёжная научно-техническая конференция IEEE «Релейная защита и автоматика, 2022.