

УДК 621.313.13

МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ОБМОТКЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Розум Т.И., Полищук В.И.

ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
Томск, e-mail: V_TAHKE@sibmail.com

Разработан метод выявления витковых замыканий в обмотке ротора синхронного генератора в режиме реального времени по токам и напряжениям, снимаемым со статорной обмотки, и току возбуждения. Метод основан на применении искусственной нейронной сети, для обучения которой использовались данные, полученные с экспериментальной установки с различным количеством витковых замыканий и при постоянстве генерируемой активной и реактивной мощности. Разработанная диагностическая система на основе искусственной нейронной сети способна определить наличие витковых замыканий в обмотке ротора синхронного генератора, количество замкнутых витков в процентах и оценить тяжесть повреждения путем анализа выходного сигнала искусственной нейронной сети. Метод возможно использовать для построения интеллектуальной системы диагностики обмотки ротора синхронных генераторов.

Ключевые слова: синхронный генератор, межвитковые замыкания, искусственная нейронная сеть (ИНС)

METHOD FOR DETECTING TORN-TO-TURN SHORT CIRCUITS OF EXCITATION WINDINGS SYNCHRONOUS GENERATOR

Rozum T.I., Polishchuk V.I.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: V_TAHKE@sibmail.com

Developed a method for detecting faults turn-to-turn short circuit rotor winding synchronous generator in real time on the currents and voltage from the stator windings, and excitation current. The method is based on the application of artificial neural networks, which are used for learning data obtained from the experimental setup with different amounts faults turn-to-turn short circuit and at constant generated by the active and reactive power. The developed diagnostic system based on artificial neural network is able to detect the presence of faults turn-to-turn short circuit in the winding rotor synchronous generator, a number of them in percentage and to estimate the extent of damage by analyzing out signal of artificial neural networks. This makes it possible to use the proposed method for to build the intellectual system diagnostics rotor winding synchronous generators.

Keywords: synchronous generator, turn-to-turn short circuits, artificial neural network (ANN)

Короткое замыкание обмотки ротора является одним из распространённых и в то же время трудно определяемых неисправностей в синхронном генераторе (СГ).

Выявление на ранних стадиях признаков неисправности является важной задачей при эксплуатации СГ [1], поскольку развитие дефекта в обмотке приводит к оплавлению меди витков и прогоранию витковой изоляции. В результате происходит появление высокочастотного колебательного процесса в цепи возбуждения, порождающего пробой изоляции в наиболее ослабленных местах [2]. Нарушается симметрия магнитного тяжения полюсов, что создает дополнительную механическую нагрузку на шейку вала, вызывающую появление микротрещин, при которых дальнейшая эксплуатация СГ невозможна.

Существующие способы выявления витковых замыканий можно разделить на следующие группы: тепловые, параметрические, частотные, вибрационные и методы активной диагностики. Известные существующие способы выявления витковых замыканий, такие как использование индукционных преобразователей [3] или импульсного воздействия на обмотку ротора

[4], полностью не решают данную проблему или для их реализации необходима установка дополнительных средств измерения в конструкцию СГ.

Постановка задачи

Исследовать возможности искусственной нейронной сети (ИНС) при диагностике и выявлении межвитковых замыканий в обмотке ротора синхронного генератора.

Идея использования искусственной нейронной сети для диагностики межвиткового замыкания в обмотке ротора СГ основывается на том, что при поддержке постоянной величины напряжения на выводах СГ существует взаимосвязь между магнитодвижущей силой обмотки ротора $F = I_f w$ и током ротора I_f . В момент неисправности магнитное поле генератора будет уменьшаться, что станет причиной изменения электродвижущей силы, которая влияет на величину реактивной мощности Q . Поскольку Q зависит от I_f , то при одном и том же значении тока возбуждения I_f величина МДС зависит от изменения количества витков обмотки ротора. Таким образом, витковое замыкание в обмотке ротора можно выявлять, определяя изменения со-

отношений параметров P , Q и I_f , причем эти параметры генератора будут являться входными нейронами ИНС [5, 6].

Обучение ИНС на основе экспериментальной машины с заранее известным количеством замкнувшихся витков позволит не только определить наличие повреждения, но и оценить его тяжесть.

Экспериментальная установка. Для диагностирования витковых замыканий у синхронных генераторов была создана экспериментальная установка, показанная на рис. 1. В ее состав входят: синхронный генератор (ГАБ-4-Т/230) 1, приводимый во вращение асинхронным двигателем, питаемым частотным преобразователем (Altivar 71) 4.

Для имитации виткового замыкания в синхронном генераторе с параметрами, приведенными в табл. 1, были выведены с обмотки ротора через дополнительные контактные кольца 2 отпайки 3 (4, 10 и 30% витков полюса).

Таблица 1
Параметры синхронного генератора

Номер модели	ГАБ-4-Т/230
Номинальное напряжение, В	230
Номинальный ток, А	12,5
Коэффициент мощности	0,8
Ток ротора, А	7,3
w /витков	225

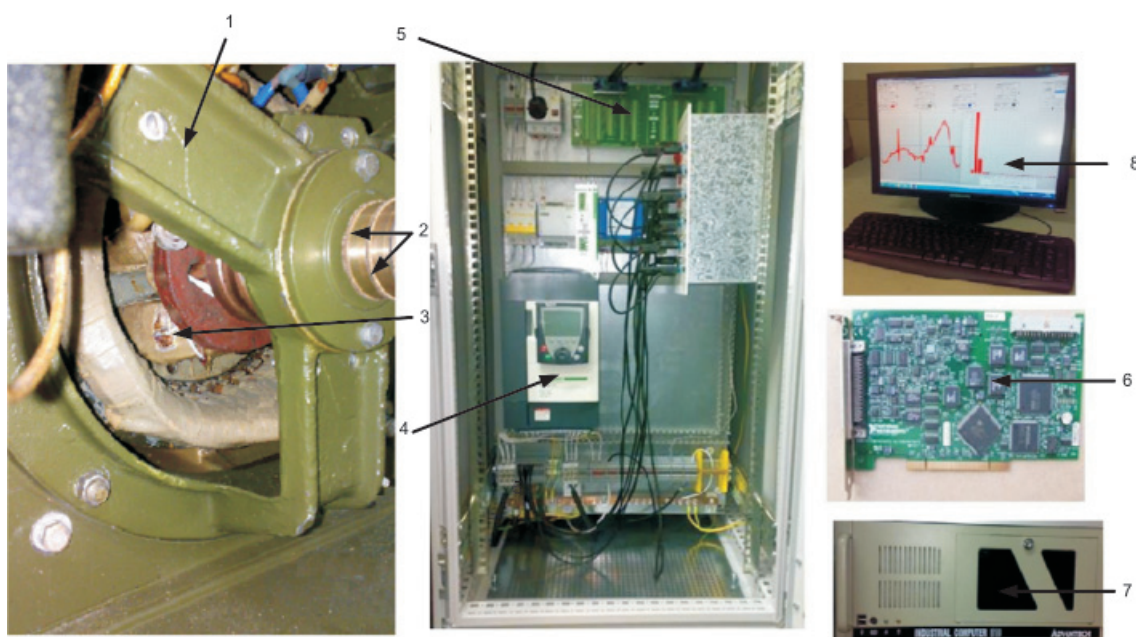


Рис. 1. Экспериментальная установка:

1 – синхронный генератор; 2 – контактные кольца; 3 – отпайки; 4 – преобразователь частоты; 5 – коннектор ввода (СВ-68LP); 6 – плата ввода/вывода; 7 – промышленный компьютер; 8 – монитор

Сигналы с СГ вводились через коннектор ввода (СВ-68LP) 5 и плату ввода/вывода (NI PCI 6024E, 12 разрядов, максимальная частота дискретизации 20 МГц, 16 аналоговых входов) 6 в промышленный компьютер 7 с монитором 8.

Метод диагностики обмотки ротора генератора с межвитковым замыканием

Преимуществом ИНС является использование при составлении нейросетевой модели только тренировочных массивов данных с обязательным учетом конструктивных особенностей объекта. При этом ИНС нечувствительна к высокочастотным помехам при обучении. Для получения тренировоч-

ных массивов данных производились витковые замыкания с помощью отпайки 3 (рис. 1) в различных режимах работы СГ.

Входными сигналами для ИНС являются ток возбуждения I_f , активная мощность P и реактивная мощность Q . Выходной сигнал ИНС показывает количество замкнутых витков в процентах.

Для решения данной задачи была выбрана структура нейронной сети (3–6–1) (рис. 2) и сигмоидальная функция (рис. 3) в качестве рабочей функции нейрона.

Обучение ИНС проводилось «с учителем» по методу Левенберга–Маркварта в Matlab2007b с использованием стандартных библиотек. Преимуществом этого ме-

тогда обучения по сравнению с методом градиентного спуска и генетическими алгоритмами является большая скорость обучения и хорошая точность.

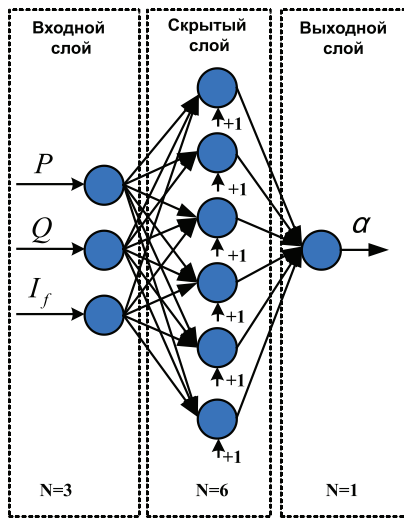


Рис. 2. Структурная схема сети

Алгоритм выявления ВЗ включает в себя сбор, масштабирование и обработку данных, обучение нейронной сети.

Обучение нейронной сети создает функцию от трех переменных $f(P, Q, I_f)$, ко-

торая закодирована с помощью нейронов и связей между ними. Напряжение и МДС генератора поддерживались постоянными $U_r = \text{const}$ и $F = \text{const}$, а ток возбуждения изменялся.

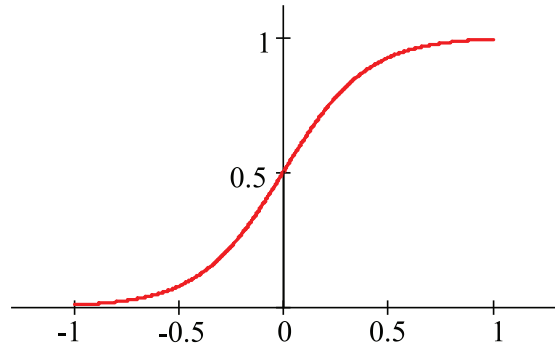


Рис. 3. График сигмоидальной функции

Принцип работы диагностической системы иллюстрирует рис. 4. Активная и реактивная мощности, вычисляемые на основе токов и напряжений статора, снятых с датчиков ДТ1-ДТ3 и ДН1-ДН3, вместе с током возбуждения, получаемого с датчика ДТВ, поступают на вход ИНС. Выходным сигналом ИНС служит количество замкнутых витков α в процентах.

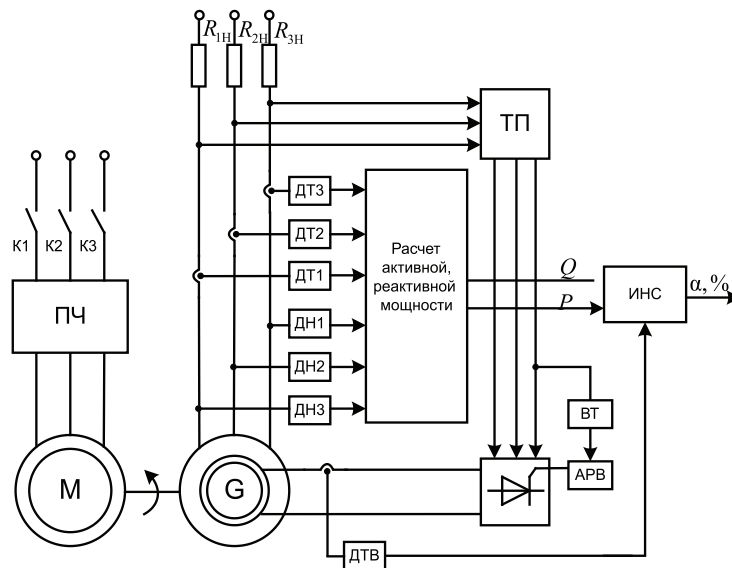


Рис. 4. Структурная схема экспериментальной установки

Экспериментальная часть. Для проверки работоспособности предложенного метода идентификации витковых замыканий был проведен ряд измерений на экспериментальной установке.

При проведении эксперимента было снято два набора данных токов и напряжений статора и ротора.

Первый набор данных используется для обучения нейронной сети при постоянной активной и реактивной мощности с 4, 10 и 30% замкнутых витков.

Второй (контрольный) набор данных применяется для определения работоспособности и адекватности предложенного метода идентификации ВЗ.

Экспериментальные данные

Активная мощность, В	Реактивная мощность, В	Ток возбуждения	Текущее количество замкнутых витков	Количество витковых замыканий, выявленных ИНС	Ошибка диагностической системы
615	820	5,1	9	10	10%
605	642	5,45	45	48	6,25%
614	537	6	112	111	0,89%

Из табл. 2 видно, что ошибка между фактическим значением и величиной полученной с выхода ИНС изменяется в пределах от 0,89 до 10%, а максимальная ошибка не превышает значение 10%. С увеличе-

нием количества витковых замыкания точность идентификации растет.

На рис. 5 представлена зависимость мгновенной реактивной мощности Q от времени t при 4% витковом замыкании.

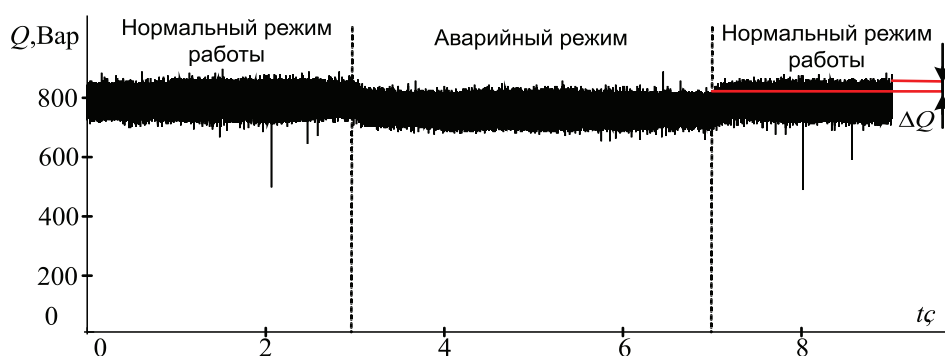


Рис. 5. Мгновенная реактивная мощность двигателя при 4% витковом замыкании

В ходе эксперимента было установлено, что в момент замыкания витков в обмотке ротора СГ происходит изменение токов и напряжений статора.

При витковом замыкании общее сопротивление цепи должно уменьшиться, а ток возбуждения I_f увеличится при одном и том же напряжении. Этот факт изображен на рис. 6.

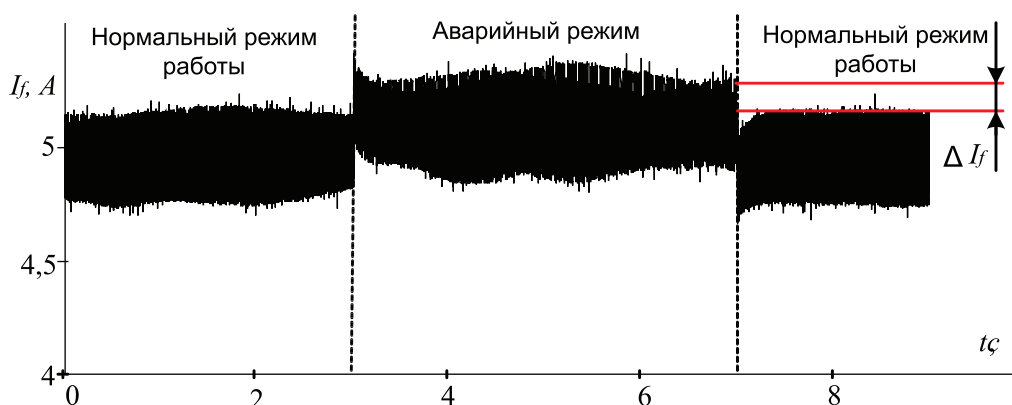


Рис. 6. Ток возбуждения I_f при 4% межвитковом замыкании

В момент ВЗ ток возбуждения увеличивается относительно нормального режима на величину ΔI_f , которая пропорциональна количеству замкнутых витков.

Диагностическая система на основе ИНС способна выявить наличие витковых замыканий СГ и их количество.

Заключение

1. Предложенный метод позволяет выявлять витковые замыкания в обмотке ротора синхронного генератора на основе штатных измерительных средств.

2. Точность определения витковых замыканий зависит от количества замкнутых витков и размера тренировочного шаблона, применяемого для обучения искусственной нейронной сети.

Работа выполнена в рамках исполнения Госзадания «Наука» ГК № 7.2826.2011.

Список литературы

1. Глебов И.Я. Диагностика турбогенераторов / И.Я. Глебов, Я.Б. Данилевский. – Л.: Наука. Ленинградское отделение, 1989. – 119 с.
2. Самородов Ю.Н. Турбогенераторы: Аварии и инциденты: техническое пособие. – М.: ЭЛЕКС-КМ, 2008. – 488 с.
3. Глебов И.Я. Научные основы проектирования турбогенераторов / И.Я. Глебов, Я.Б. Данилевский. – Л.: Наука. Ленинградское отделение, 1986. – 184 с.
4. Wood J.W., Hindmarch R.T. Rotor winding short detection. IEEE Proceedings. – 1986. – Vol 133. pt B, № 3. – P. 181–189.
5. Ma H.Z., Pu L. Fault Diagnosis Based on ANN for Turn-to-Turn Short Circuit of Synchronous Generator Rotor Windings // J. Electromagnetic Analysis & Applications. – 2009. – № 3. – P. 187–191.
6. Ligio Wang, Yi Wang, Dianguo Xu, Bo Fang, Qinghe Liu, Jing Zou. Application of HHT for Online Detection of Inter-Area Short Circuit of Rotor Windings of Turbo-

Generators Based on the Thermodynamics Modeling Method // Journal of Power Electronics. – 2011. – Vol. 11. – № 3. – P. 759–766.

References

1. Glebov I.J. Diagnosis turbogenerators / I.Y. Glebov, Y.B. Danilevsky. L.: Nauka. Leningrad Branch, 1989. 119 p.
2. Samorodov U.N. Turbogenerators: Accidents and incidents. Technical manual. M: ELEKS-CM, 2008. 488 p.
3. Glebov I.J. Scientific basis of the design of turbine generators / I.Y. Glebov, Y.B. Danilevsky. L.: Nauka. Leningrad Branch, 1986. 184 p.
4. Wood J.W., Hindmarch R.T. Rotor winding short detection. IEEE Proceedings. 1986. Vol 133. pt B, no. 3. pp. 181–189.
5. H. Z. MA, L. PU. Fault Diagnosis Based on ANN for Turn-to-Turn Short Circuit of Synchronous Generator Rotor Windings. J. Electromagnetic Analysis & Applications. 2009. no. 3. pp. 187–191.
6. Ligio Wang, Yi Wang, Dianguo Xu, Bo Fang, Qinghe Liu, Jing Zou. Application of HHT for Online Detection of Inter-Area Short Circuit of Rotor Windings of Turbo-Generators Based on the Thermodynamics Modeling Method. Journal of Power Electronics. 2011. Vol. 11. no. 3. pp. 759–766.

Рецензенты:

Кабышев А.В., д.т.н., профессор кафедры ЭПП ЭНИН, ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск;

Исаев Ю.Н., д.ф.-м.н., профессор кафедры ЭСиЭ ЭНИН, ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Работа поступила в редакцию 15.07.2013.