

ИЗМЕРЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА МЕТОДОМ ГАШЕНИЯ ПОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШТАТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ

А.В. Прокудин, М.Е. Гольдштейн

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Проанализированы известные методы измерений постоянных времени синхронного генератора, основанные на опытах гашения поля. Показано, что в условиях эксплуатации генератора на электростанции эти методы труднореализуемы. Обоснована возможность применения методов, максимально использующих штатное оборудование и элементы схем систем генератора, в частности, контура постоянного тока с обмоткой и системой возбуждения. К таким относятся следующие методы: со съемом импульсов управления с тиристоров преобразователя возбудителя; с применением штатной защиты от замыканий на контактных кольцах; с применением дополнительного шунтирующего диода. На основе экспериментальной проверки приведены сравнительные результаты опытов, выполненных по разным методикам. Рассмотренные опыты применимы для реализации всех известных методов DC decay Test при наличии источника постоянного тока, независимого от испытуемого генератора (независимая система возбуждения соседнего генератора, резервная система возбуждения или система возбуждения, питаемая от собственных нужд электростанции).

Ключевые слова: синхронный генератор, гашение поля, измерение постоянной времени, DC decay Test.

Постановка задачи

При подготовке исходных данных для анализа электромагнитных процессов при гашении поля и выборе параметров устройства гашения поля синхронного генератора необходима информация об активных сопротивлениях, а также постоянных времени его обмоток и контуров по продольной оси [1]. Согласно Нормам [2, 3] измерения сопротивлений на постоянном токе обмоток генераторов производятся многократно в течение всего его срока эксплуатации. Постоянные времени же определяются только при заводских испытаниях машины либо после серьезной реконструкции на месте эксплуатации. Если с получением информации об активных сопротивлениях обмоток генераторов, находящихся в длительной эксплуатации, проблем не возникает, то протоколы заводских испытаний со значениями постоянных времени часто отсутствуют. Поэтому при реконструкции устройства гашения поля, в частности с заменой на тиристорное [4], приходится экспериментально определять некоторые параметры синхронного генератора: переходную постоянную времени по продольной оси при разомкнутом статоре – τ'_{d0} , переходную постоянную времени по продольной оси при замкнутом статоре – τ'_{d} , постоянную времени контура возбуждения τ_{fd} и постоянную времени демпфирующих контуров τ_{1d} . Заметим, что эти же параметры необходимы и при расчетах некоторых переходных процессов в энергосистеме.

Для их экспериментального определения в соответствии с ГОСТ 10169–77 применяют методы, основанные на опытах гашения поля [5, 6], известные в мировой практике как DC decay Test [7–17]. Методы позволяют проводить измерения большинства параметров схемы замещения, в первую очередь реактивных сопротивлений и постоянных времени.

Все известные методы измерений параметров синхронной машины DC decay Test реализуют следующий алгоритм: первоначально проводится возбуждение магнитного поля постоянным током, протекающим через возбуждающую обмотку (обмотку возбуждения или обмотку статора), затем возбуждающая обмотка замыкается накоротко, после чего выполняется анализ зависимостей токов и напряжений в цепях обмоток синхронной машины. В частности, метод, основанный на опыте гашения магнитного поля обмотки возбуждения, опирается на анализ зависимостей напряжения статора, тока $i_f(t)$ и напряжения ротора при внезапном изменении режима контура возбуждения [5]. Генератор предварительно возбуждается от возбудителя (рис. 1) до номинального напряжения статора. После этого обмотка возбуждения генератора (E_W) замыкается на резистор R_1 включением коммутационного аппарата K_2 и отключается от возбудителя выключателем K_1 . Опыты проводятся при замыкании обмотки накоротко ($R_1 = 0$) и на известное сопротивление при разомк-

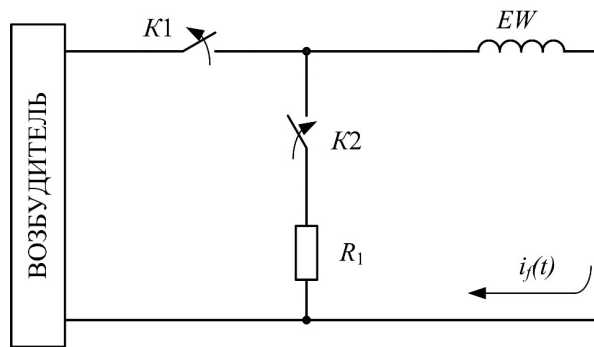


Рис. 1. Схема контура возбуждения генератора при измерениях методом гашения поля

нутых и замкнутых накоротко обмотках статора. На основе анализа полученных осциллограмм токов и напряжений статора и ротора определяются искомые постоянные времени.

Особенность всех методов DC decay Test – необходимость создания короткого замыкания на выводах возбуждаемой обмотки ($R_1 = 0$ на рис. 1), получающей при этом питание от источника постоянного напряжения – возбудителя. Это приводит к появлению сверхтоков в цепях источника и его возможной аварии. Рекомендуемое в работах [5, 7–17] включение дополнительного токоограничивающего резистора последовательно с выключателем из-за падения напряжения на нем затруднит возбуждение генератора до номинальных токов обмотки или номинального напряжения статора. Кроме этого, резистор должен быть рассчитан на длительное протекание значительных токов. Поэтому в условиях эксплуатации генератора на электростанции эти методы трудно реализуемы. Желательно применять методы, максимально использующие оборудование и элементы схем систем генератора, в частности, контура постоянного тока и системы возбуждения.

Применение штатных элементов систем возбуждения

Рассмотрим методы испытаний, для реализации которых применяются схемы, использующие в основном штатные элементы систем генератора, в частности элементы контура постоянного тока генератора и его системы возбуждения.

Съем импульсов управления с тиристоров преобразователя возбудителя. Предлагаемый в [18] метод проведения опыта не приводит к появлению сверхтоков в цепях возбудителя. Согласно этому методу генератор предварительно возбуждается от тиристорного возбудителя, выполненного по трехфазной мостовой схеме. Далее производится съем импульсов управления с тиристоров и обмотка возбуждения остается включенной в контур, состоящий из двух фаз источника переменного тока возбудителя (например, трансформатора TE) и двух тиристоров (рис. 2).

Ток в цепи обмотки возбуждения $i_f(t)$ снижается до тех пор, пока не выключатся тиристоры. Особенность способа в том, что в контуре обмотки возбуждения присутствует переменная ЭДС источника питания возбудителя. Это приводит к появлению переменной составляющей в токе обмотки возбуждения, что усложняет обработку осциллограмм. Кроме этого, наличие переменной составляющей в токе возбуждения приводит к появлению дополнительных токов в демпфирующих контурах, действующих на размагничивание магнитной системы, что искажает результаты измерений. Действие токов демпфирующих контуров на электромагнитные процессы в обмотке возбуждения при гашении поля рассмотрено в работе [19].

Применение защиты от замыканий на контактных кольцах. Типичная схема цепей возбуждения (рис. 3) содержит: возбудитель (тиристорный преобразователь) $A1$, быстродействующий выключатель (автомат гашения поля, АГП) $Q1$ и

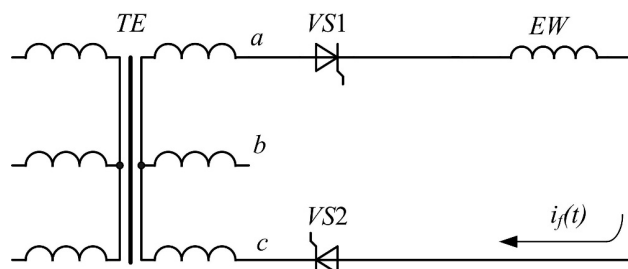


Рис. 2. Схема контура обмотки возбуждения при гашении поля методом снятия импульсов

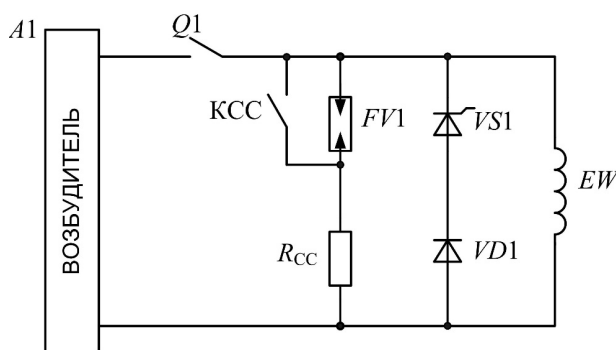


Рис. 3. Схема цепей возбуждения генератора

цепь защиты от перенапряжений, состоящую из последовательно включенных резистора R_{CC} и тиристорного разрядника $FV1$, параллельно которому подключен контактор самосинхронизации KCC . Часть систем возбуждения оснащается защитой от замыканий на контактных кольцах [20]. Силовая часть защиты выполнена в виде цепи, состоящей из последовательно включенных тиристора $VS1$ и диода $VD1$ и подключенной, как и цепь защиты от перенапряжений, параллельно выводам обмотки возбуждения ОВГ.

Применение цепей защит от перенапряжений и замыканий на кольцах ротора позволяет провести опыты по измерению постоянных времени генератора методом гашения поля без дополнительного силового оборудования и изменений в силовой части системы возбуждения. Для проведения опыта гашения поля с замыканием обмотки возбуждения генератора накоротко вводится в действие защита от замыканий на кольцах. При пуске защиты тиристорный преобразователь $A1$ переходит в режим инвертирования, сразу за этим включается тиристор $VS1$ и ток обмотки возбуждения замыкается по цепи $VS1-VD1$. Так как прямое падение напряжения на тиристоре и диоде много меньше номинального напряжения возбуждения генератора и составляет единицы вольт, то режим эквивалентен короткому замыканию, что не приводит к увеличению погрешности измерений. При этом сверхтоков в цепях возбудителя не возникает. При реализации опыта гашения поля на резистор R_{CC} принудительно включается контактор KCC .

Срабатывает защита от перегрева резистора синхронизации, что приводит к отключению возбудителя и гашению поля на R_{CC} . При необходимости часть элементов резистора R_{CC} шунтируется с целью уменьшения его сопротивления.

Применение шунтирующего диода. В случае отсутствия защиты от замыканий на кольцах опыт гашения поля с замыканием обмотки возбуждения может быть проведен при установке дополнительного диода параллельно выводам ОВГ (рис. 4).

Для проведения опыта возбудитель создает в цепи возбуждаемой обмотки необходимый ток. После этого или отключается выключатель $Q1$ (см. рис. 4) или, если система возбуждения тиристорная, преобразователь переводится в режим инвертирования. Ток возбуждаемой обмотки замыкается через диод $VD1$.

При этом следует учитывать то, что при возбуждении генератора от тиристорного возбудителя в его выпрямленном напряжении присутствуют отрицательные импульсы, вызывающие отпирание шунтирующего диода (при углах управления больше 60 гр. эл.) [21]. Ток возбуждаемой обмотки состоит из суммы токов тиристорного преобразователя и тока шунтирующего диода:

$$I_f = I_T + I_D. \quad (1)$$

Среднее значение тока, на длительное протекание которого должен быть рассчитан шунтирующий диод:

$$I_D = \frac{I_f}{1+K_0}. \quad (2)$$

Коэффициент K_0 задает соотношение токов

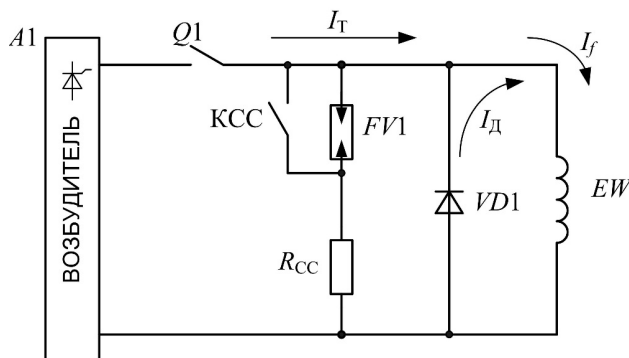


Рис. 4. Схема цепей возбуждения с шунтирующим диодом

тиристорного преобразователя и шунтирующего диода:

$$K_{\theta} = \frac{\theta_T}{\theta_D} = \frac{120 - \alpha}{\alpha - 60}. \quad (3)$$

Здесь $\theta_T + \theta_D = 60$ гр. эл. – длительности протекания тока через тиристорный преобразователь и шунтирующий диод соответственно. Соотношение (3) получено, исходя из анализа электромагнитных процессов в схеме тиристорного преобразователя с шунтирующим диодом и активно-индуктивной нагрузкой [21].

Тиристорный преобразователь возбудителя будет работать в режиме прерывистых токов, эквивалентном работе на чисто активную нагрузку. При этом диапазон углов управления в режиме выпрямления расширится до 120 гр. эл. В случае опыта с обмоткой возбуждения ток возбуждения при холостом ходе генератора составляет примерно 1/3 от тока возбуждения в номинальном режиме. Поэтому углы управления тиристорным преобразователем α могут превысить 90 гр. эл., что следует учитывать при планировании эксперимента, так как в некоторых системах возбуждения есть ограничение в 90 гр. эл. по максимальному углу управления в режиме выпрямления.

Эта схема цепей постоянного тока применима для проведения всех опытов гашения поля возбуждаемых обмоток генератора (статора и ротора) при условии, что система возбуждения работает независимо от генератора – штатная система возбуждения с питанием от цепей собственных нужд электростанции или независимая система возбуждения соседнего генератора, или резервная система возбуждения.

Экспериментальная проверка методов

Метод измерения постоянной времени катушки индуктивности τ_f первоначально опробован на линейном реакторе. Реактор (катушка индуктивности без ферромагнитного сердечника) намагничивался током 10 А от тиристорного преобразова-

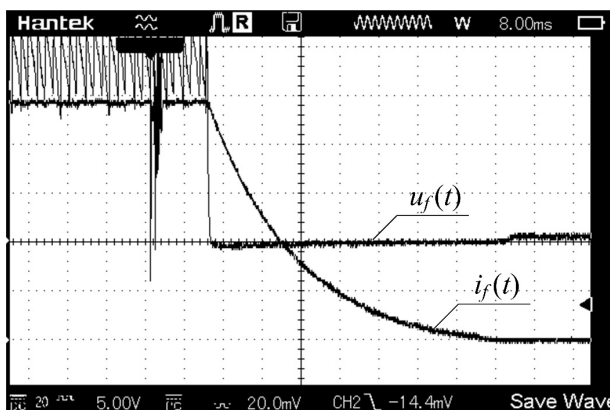


Рис. 5. Осциллограммы тока $i_f(t)$ и напряжения $u_f(t)$ реактора в опыте гашения поля на диод. Масштабы: $i_f(t) - 2$ А/дел., $u_f(t) - 5$ В/дел., $t - 8$ мс/дел.

теля. Опыт гашения поля реализовывался переводом тиристорного преобразователя в режим инвертирования с шунтированием реактора на диод типа В25-7. Получены осциллограммы тока и напряжения реактора (рис. 5).

По результатам опыта в соответствии с методикой [4] определена постоянная времени катушки $\tau_f = 19,1$ мс. По результатам измерений на постоянном и переменном токах (мост постоянного тока ММВ и амперметр-вольтметр) постоянная времени испытуемой катушки τ_f составила 20,24 мс. Разница результатов измерения – 5,6 %, что приемлемо. Возникновения сверхтоков при проведении опыта не наблюдалось.

Метод измерений постоянной времени со снятием импульсов управления с тиристорного преобразователя проверен на аналоге магнитной системы турбогенератора. В качестве аналога использован электромагнит включения привода выключателя ПЭ-11. Аналог представляет собой цилиндрическую обмотку, помещенную в массивный магнитопровод из низкоуглеродистой стали, что эквивалентно обмотке возбуждения, размещенной на массивной стальной поковке ротора турбогенератора. Обмотка возбуждалась выпрямленным током 13 А от тиристорного преобразователя. Зависимости тока и напряжения при снятии импульсов управления с тиристорного преобразователя приведены на рис. 6. Постоянная времени τ_f определена по методике, изложенной в [5].

Кроме этого, проведен опыт измерения постоянной времени τ_f методом гашения поля на диод и измерены индуктивность методом амперметра-вольтметра на переменном токе частотой 50 Гц и активное сопротивление мостом постоянного тока типа ММВ. По данным этих измерений вычислены постоянные времени обмотки аналога. Результаты представлены в таблице.

Из результатов опытов видно, что появление переменной составляющей в токе катушки с массивным ферромагнитным магнитопроводом (опы-

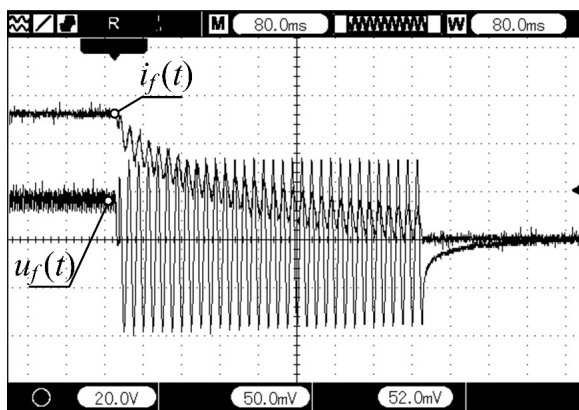


Рис. 6. Осциллограмма тока $i_f(t)$ и напряжения $u_f(t)$ катушки индуктивности с массивным ферромагнитным сердечником при снятии импульсов управления с тиристорного преобразователя. Масштабы: $i_f(t) - 5$ А/дел., $u_f(t) - 20$ В/дел.

Таблица

№	Метод	τ_p , с
1	Съем импульсов с тиристорного преобразователя	0,206
2	Гашение поля на диод	0,401
3	Мост постоянного тока + Амперметр-вольтметр на 50 Гц	0,077

ты 2 и 3 в таблице) приводит к искажению результатов определения постоянной времени. Это объясняется размагничивающим действием токов, создаваемых в массивном магнитопроводе. Причем чем больше скорость изменения тока в обмотке возбуждения, тем сильнее размагничивающее действие токов в магнитопроводе [19].

Проверка метода измерения постоянных времени путем гашения поля обмотки возбуждения на реальной синхронной машине проводилась на синхронном явнополюсном генераторе БМЗ-4,5/4 1500 об/мин, возбуждаемом от тиристорного преобразователя током 22,6 А. Гашение поля обмотки возбуждения осуществлялось отключением выключателя возбуждения и переводом тиристорного преобразователя в режим инвертирования с шунтированием ОВГ на стабилитрон с падением напряжения 7 В, что составило 10 % от исходного напряжения возбуждения. В результате получены осциллограммы напряжения статора $u_{ST}(t)$, тока $i_f(t)$ и напряжения $u_f(t)$ обмотки возбуждения (рис. 7).

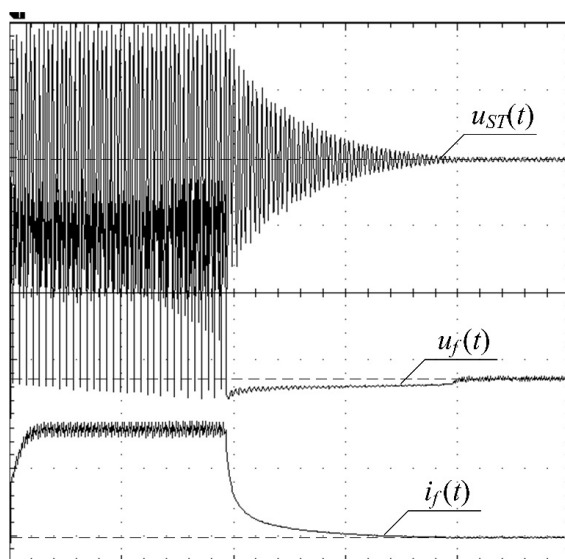


Рис. 7. Осциллограммы зависимостей напряжения статора $u_{ST}(t)$, тока $i_f(t)$ и напряжения обмотки возбуждения $u_f(t)$ генератора БМЗ-4,5/4. Масштабы: $u_{ST}(t)$ – 400 В/дел., $i_f(t)$ – 20 А/дел., $u_f(t)$ – 25 В/дел., t – 500 мс/дел.

Анализ процесса и результатов опыта гашения поля показал, что сверхтоков в цепях тиристорного преобразователя не возникает, полученные осциллограммы позволяют определить постоянную времени обмотки возбуждения испытуемого генератора по известной методике.

Выводы

1. Известные методы измерения постоянных времени синхронного генератора, основанные на опытах гашения поля с коротким замыканием в цепях контура возбуждения генератора, трудно реализуемы в условиях электростанции из-за необходимости при этом принятия мер к ограничению бросков токов возбудителя.

2. Метод гашения поля снятием импульсов с тиристорного преобразователя выполнен только в случае тиристорного возбудителя и не дает точных результатов.

3. Использование силовых элементов защиты от замыканий на контактных кольцах генератора требует минимального объема подготовительных работ, не приводит к возникновению сверхтоков в цепях системы возбуждения и дает удовлетворительные результаты измерений.

4. При отсутствии защиты от замыканий на контактных кольцах генератора установка шунтирующего диода позволяет провести опыт гашения поля на короткое замыкание без возникновения сверхтоков.

5. Описанные методики применимы для реализации всех известных методов DC decay Test при наличии источника постоянного тока, независимого от испытуемого генератора (независимая система возбуждения соседнего генератора, резервная система возбуждения или система возбуждения, питаемая от собственных нужд электростанции).

Литература

1. Taborda, J. *Modern technical aspects of Field Discharge equipment for excitation systems / J. Taborda // Power and Energy Society General Meeting, Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century.* – 2008. – P. 1–8. – DOI: 10.1109/PES.2008.4596955
2. СТО 34.01-23.1-001-2017. *Объем и нормы испытаний электрооборудования.* – Утвержден и введен в действие распоряжением ПАО «Россети» от 29.05.2017 № 280р. – https://www.rosseti.ru/investment/standart/corp_atandart/doc/34.01-23.1-001-2017.pdf (дата обращения: 19.04.2019).
3. ГОСТ 183–74. *Машины электрические вращающиеся. Общие технические условия (с изменениями № 1 и № 2).* – Переиздание (декабрь 1992 г.) с Изменениями № 1, 2, утвержденными в январе 1981 г., в феврале 1982 г. (ИУС № 3 – 1981 г., ИУС № 5 – 1982 г.). – М.: Изд-во стандартов, 1993.

4. Гольдштейн, М.Е. Турбосторное устройство гашения поля синхронного генератора с системой самовозбуждения / М.Е. Гольдштейн, А.В. Прокудин // *Электротехника*. – 2013. – №10. – С. 41–45. DOI: 10.3103/s1068371213100040
5. ГОСТ 10169–77. Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний. – Переиздание декабрь 1983 г. с Изменениями № 1, 2, 3, утвержденными в марте 1980 г., ноябре 1982 г., декабре 1983 г. (ИУС № 5 – 1980 г., ИУС № 2 – 1983 г., ИУС № 3 – 1984 г.). – М.: Изд-во стандартов, 1984.
6. ГОСТ Р МЭК 60034-4-2012. Методы экспериментального определения параметров синхронных машин. Часть 4: Методы экспериментального определения параметров синхронных машин. – Введ. 2014-06-01. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 ноября 2012 г. № 1111-ст. – М.: Стандартинформ, 2014.
7. Majka, L. A stationary DC decay test on the 7.5 MVA turbogenerator installed in a thermal power plant / L. Majka, D. Szuster // *CPEE – AMTEE 2013: Joint conference Computational Problems of Electrical Engineering and Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering: 4th – 6th September 2013, Roztoky u Křivoklátu, Czech Republic*. – 2013. – P. VI-1.
8. Determination of Equivalent-circuit Parameters of a Synchronous Generator Based on the Standstill DC Decay Test and a Hybrid Optimization Method / M. Cisneros-Gonzalez, C. Hernandez, R. Escarela-Perez, M.A. Arjona // *Electric Power Components and Systems*. – 2011. – Vol. 39:7. – P. 645–659. – DOI: 10.1080/15325008.2010.536808
9. On the Identification of the Synchronous Machine Parameters Using Standstill DC Decay Test / L. Vicol, M. Tu Xuan, R. Wetter et al. // *ICEM, Chania, Crete Island, Greece*. – 2006. – <https://infoscience.epfl.ch/record/129884/files/identif.pdf> (дата обращения: 19.04.2019).
10. Majka, L. Application of the stationary DC decay test to industrial turbogenerator model parameter estimation / L. Majka, D. Szuster // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2014. – No. 4 (90). – P. 242–245.
11. Experimental determination of synchronous machines reactances from DC Decay at standstill / V. Groza, M. Biriescu, Gh. Liuba, V. Cretu // *IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Rediscovering Measurement in the Age of Informatics (Cat. No. 01CH 37188), Budapest, Hungary, May 21–23, 2001*. – 2001. DOI: 10.1109/IMTC.2001.929541
12. Turner, P.J. The DC decay test for determining synchronous machine parameters: measurement and simulation / P.J. Turner, A.B.J. Reece, D.C. Macdonald // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 1989. – Vol. 4, iss. 4. – P. 616–623. DOI: 10.1109/60.41720
13. Sellschopp, F.S. DC decay test for estimating d-axis synchronous machine parameters: a two-transfer-function approach / F.S. Sellschopp, M.A. Arjona // *IEEE Proceedings – Electric Power Applications*. – 2006. – Vol. 153, iss. 1. – P. 123–128. DOI: 10.1049/ip-epa:20050248
14. Maurer, F. Two Full Parameter Identification Methods for Synchronous Machine Applying DC-Decay Tests for a Rotor in Arbitrary Position / F. Maurer, Mai Tu Xuan, J.-J. Simond // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2017. – Vol. 53, iss. 4. – P. 3505–3518. DOI: 10.1109/TIA.2017.2688462
15. Time-domain identification of synchronous machine parameters from simple standstill tests / E.S. Boje, J.C. Balda, R.G. Harley, R.C. Beck // *IEEE Transactions on Energy conversion*. – 1990. – Vol. 5, iss. 1. – P. 164–175. DOI: 10.1109/60.50828
16. Vahedi, M. Unique Solution For Dynamic Parameters Identification of a Synchronous Machine Using DC Decay Test / M. Vahedi, A. Hassania, H. Lotfian // *Journal of Electrical Engineering, University “POLITEHNICA”, Timisoara, Romania*. – 2013. – Vol. 3. – P. 249–257.
17. Calculation of Equivalent Circuit Constants of Synchronous Machines Considering Field Transient Characteristics Using DC Decay Testing Method with Open and Shorted Field Windings / T. Kano, Y. Watanabe, T. Ara, T. Matsumura // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2009. – Vol. 129, iss. 3. – P. 325–331. DOI: 10.1541/ieejias.129.325
18. Пат. 2020504 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/34. Способ определения постоянных времени синхронных электрических машин со стороны индуктора / Е.В. Савченко, Ю.А. Шмайн. – № 4765194/22; заявл. 20.10.1989; опубл. 30.09.1994.
19. Брон, О.Б. Автоматы гашения магнитного поля / О.Б. Брон. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 138 с. – (Библиотека по автоматике. Вып. 34).
20. А.с. 1363365 СССР, МКИ H 02H 7/08, 7/12, H 02 K 11/00. Синхронная электрическая машина / М.Е. Гольдштейн, А.Ф. Гаген, Р.Р. Гайнуллин и др. (СССР). – № 4038675/24-07; заявл. 21.01.1986; опубл. 30.12.1987, Бюл. № 48.
21. Забродин Ю.С., *Промышленная электроника: учеб. для вузов* / Ю.С. Забродин. – М.: Высш. шк., 1982. – 496 с.

Прокудин Александр Владимирович, ведущий инженер, старший преподаватель кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; prokudinav@susu.ru.

Гольдштейн Михаил Ефимович, канд. техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; susu-meg@mail.ru.

Поступила в редакцию 8 мая 2019 г.

DOI: 10.14529/power190403

MEASUREMENT OF CERTAIN SYNCHRONOUS GENERATOR PARAMETERS BY FIELD DISCHARGE METHOD USING REGULAR EXCITATION SYSTEMS ELEMENTS

A.V. Prokudin, prokudinav@susu.ru,

M.E. Gol'dstein, susu-meg@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The paper analyzes the known methods of measuring synchronous generator time constants based on field quenching experiments. It shows that these methods are difficult to implement under the operating conditions of a power station generator. The paper further substantiates the possibility of using methods that maximize the use of standard equipment and elements of the generator system circuits, in particular, a DC circuit with a winding and excitation system. These methods are as follows: the removal of control pulses from the thyristors of the exciter transducer; using standard protection against the closures on contact rings; additional shunt diode usage. The verified comparative results of experiments performed by different methods are given. The considered experiments are applicable to the implementation of all known DC decay test methods in the presence of a DC source independent of the tested generator (independent excitation system of a neighboring generator, backup excitation system or excitation system powered by the power plant's own needs).

Keywords: synchronous generator, field discharge, time constant measurement, DC decay Test.

References

1. Taborda J. Modern Technical Aspects of Field Discharge Equipment for Excitation Systems. *Power and Energy Society General Meeting, Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008, pp. 1–8. DOI: 10.1109/PES.2008.4596955
2. *STO 34.01-23.1-001-2017. Ob'em i normy ispytaniy elektrooborudovaniya* [Corporate Standard STO 34.01-23.1-001-2017. The Scope and Standards of Electrical Equipment Testing]. Available at: https://www.rosseti.ru/investment/standart/corp_atandart/doc/34.01-23.1-001-2017.pdf (accessed 19 April 2019). (in Russ.)
3. *GOST 183–74 Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya. Obshchie tekhnicheskie usloviya (s izmeneniyami N 1 i N 2)* [State Standard GOST 183–74. Rotating Electrical Machinery. General Specifications (With Changes No. 1 and No. 2)]. Moscow, Standards Publ., 1993. 26 p.
4. Gol'dshtein, M.E., Prokudin A.V. A Thyristor Field-Suppression Device for a Synchronous Generator with a Self-Excitation System. *Russian Electrical Engineering (Elektrotehnika)*, 2013, vol. 84, no. 10, pp. 572–576. (in Russ.) DOI: 10.3103/s1068371213100040
5. *GOST 10169–77. Mashiny elektricheskiye trekhfaznyye sinkhronnyye. Metody ispytaniy* [State Standard GOST 10169–77. Three-Phase Electric Synchronous Machines. Test Methods]. Moscow, Standards Publ., 1984. 85 p.
6. *GOST R MEK 60034-4–2012. Metody eksperimental'nogo opredeleniya parametrov sinkhronnykh mashin. Chast' 4: Metody eksperimental'nogo opredeleniya parametrov sinkhronnykh mashin.* [State Standard GOST R IEC 60034-4–2012 Rotating Electrical Machines. Part 4: Methods for Determining Synchronous Machine Quantities from Tests]. Moscow, Standardinform Publ., 2014. 87 p.
7. Majka L., Szuster D.A Stationary DC Decay Test on the 7.5 MVA Turbogenerator Installed in a Thermal Power Plant, *CPEE – AMTEE 2013: Joint Conference Computational Problems of Electrical Engineering and*

Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering: 4th – 6th September 2013 Roztoky u Křivoklátu, Czech Republic, 2013, pp. VI-1.

8. Cisneros-Gonzalez M., Hernandez C., Escarela-Perez R., Arjona M.A., Determination of Equivalent-Circuit Parameters of a Synchronous Generator Based on the Standstill DC Decay Test and a Hybrid Optimization Method. *Electric Power Components and Systems*, 2011, vol. 39, iss. 7, pp. 645–659. DOI: 10.1080/15325008.2010.536808

9. Vicol L., Tu Xuan M., Wetter R., Simond J.-J., Viorel I.A. On the Identification of the Synchronous Machine Parameters Using Standstill DC Decay Test. *ICEM*, Chania, Crete Island, Greece, 2006. Available at: <https://infoscience.epfl.ch/record/129884/files/identif.pdf> (accessed 19 April 2019).

10. Majka L., Szuster D. Application of the Stationary DC Decay Test to Industrial Turbogenerator Model Parameter Estimation. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2014, vol. 4 (90), pp. 242–245.

11. Groza V., Biriescu M., Liuba Gh., Cretu V. Experimental Determination of Synchronous Machines Reactances from DC Decay at Standstill. *IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Rediscovering Measurement in the Age of Informatics (Cat. No.01CH 37188)*, Budapest, Hungary, 2001. DOI: 10.1109/IMTC.2001.929541

12. Turner P.J., Reece A.B.J., Macdonald D.C. The DC Decay Test for Determining Synchronous Machine Parameters: Measurement and Simulation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1989, vol. 4, iss. 4, pp. 616–623. DOI: 10.1109/60.41720

13. Sellschopp F.S., Arjona M.A. DC Decay Test for Estimating d-Axis Synchronous Machine Parameters: a Two-transfer-function Approach. *IEEE Proceedings – Electric Power Applications*, 2006, vol. 153, iss. 1, pp. 123–128. DOI: 10.1049/ip-epa:20050248

14. Maurer F., Tu Xuan M., Simond J.-J. Two Full Parameter Identification Methods for Synchronous Machine Applying DC-Decay Tests for a Rotor in Arbitrary Position. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, vol. 53, iss. 4, pp. 3505–3518. DOI: 10.1109/TIA.2017.2688462

15. Boje E.S., Balda J.C., Harley R.G., Beck R.C. Time-domain Identification of Synchronous Machine Parameters from Simple Standstill Tests. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1990, vol. 5, iss. 1, pp. 164–175. DOI: 10.1109/60.50828

16. Vahedi M., Hassania A., Lotfian H. Unique Solution For Dynamic Parameters Identification of a Synchronous Machine Using DC Decay Test. *Journal of Electrical Engineering*, University “POLITEHNICA”, Timisoara, Romania, 2013, vol. 3, pp. 249–257.

17. Kano T., Watanabe Y., Ara T., Matsumura T. Calculation of Equivalent Circuit Constants of Synchronous Machines Considering Field Transient Characteristics Using DC Decay Testing Method with Open and Shorted Field Windings. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2009, vol. 129, iss. 3, pp. 325–331. DOI: 10.1541/ieejias.129.325

18. Savchenko E.V., Shmain Yu.A. *Sposob opredeleniya postoyannykh vremeni sinkhronnykh elektricheskikh mashin so storony induktora*. [Method for Determining Time Constants of Synchronous Electrical Machines from the Inductor Side. Application]. Patent RF 2020504, no. 4765194/22; decl. 1989.10.20; publ. 09.30.1994.

19. Bron O.B. *Avtomaty gasheniya magnitnogo polya* [Automatic Magnetic Field Quenching]. *Biblioteka po avtomatike. Vyp. 34* [Library for Automatics. Vol. 34.]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1961. 138 p.

20. Gol'dstein M.E., Hagen A.F., Gainullin R.R. *Sinkhronnaya elektricheskaya mashina* [Synchronous Electric Machine]. Patent USSR, no. 1363365, 1987.

21. Zabrodin Yu.S. *Promyshlennaya elektronika: uchebnik dlya vuzov* [Industrial Electronics: A Textbook for High Schools]. Moscow, Higher School Publ., 1982. 496 p.

Received 8 May 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Прокудин, А.В. Измерение некоторых параметров синхронного генератора методом гашения поля с использованием штатных элементов систем возбуждения / А.В. Прокудин, М.Е. Гольдштейн // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 26–33. DOI: 10.14529/power190403

FOR CITATION

Prokudin A.V., Gol'dstein M.E. Measurement of Certain Synchronous Generator Parameters by Field Discharge Method Using Regular Excitation Systems Elements. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 26–33. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190403