МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ'18

Сборник докладов

16–20 апреля 2018 г.

ГУАП
Санкт-Петербург
2018

УДК 001
ББК 72
З-13

З-13 Завалишинские чтения'18: сб. докл. / СПб.: ГУАП, 2018. 271 с.: ил.

ISBN 978-5-8088-1280-2

Помещенные в сборник доклады отражают весь спектр направлений научных работ, проводимых факультетом: от проектирования отдельных элементов и устройств, технологий их создания, решения вопросов диагностики и разработки прикладного программного обеспечения до построения сложных систем и комплексов, различных по своему функциональному назначению.

Оргкомитет конференции

Ю. А. Антохина – доктор экономических наук, ректор ГУАП
А. А. Оводенко – доктор технических наук, профессор, президент ГУАП
В. Ф. Шишлаков – доктор технических наук, профессор, директор Института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике
А. А. Ефимов – доктор технических наук, профессор кафедры управления в технических системах
А. Л. Ронжин – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники

УДК 001
ББК 72

ISBN 978–5–8088-1280-2

© Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2018

УДК 621.313.126

Д. В. Кукушкин
ведущий инженер-конструктор
ПАО «Силовые машины»

СПОСОБ ГАШЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ВОЗБУДИТЕЛЯ

В статье рассмотрены современные способы гашения поля синхронных генераторов, приведен расчет гашения поля на конденсатор большой емкости.

Ключевые слова: *система возбуждения, вращающийся возбудитель, гашение поля.*

D. V. Kukushkin
Leading Design Engineer
PJSC “Power Machines”

FIELD SUPPRESSION METHOD OF THE ROTATING EXCITER FIELD WINDING

The article presents the modern methods of the field suppression of the synchronous machines, shown calculation of the field suppression on the capacitor with the large capacity.

Keywords: *excitation system, rotating exciter, field suppression.*

Гашение поля обмотки возбуждения является главным способом минимизации ущерба при аварийных режимах работы синхронных генераторов. Проблема гашения поля наиболее актуальна для бесщеточных генераторов, в цепи которых, как правило, отсутствует коммутационная аппаратура. Большинство производителей устанавливают цепи гашения поля только в статической системе возбуждения индуктора, а поле обмотки ротора синхронного генератора затухает с естественной постоянной времени T'_{d0}.

Гашение поля на постоянное или нелинейное сопротивление

В настоящее время наиболее широкое распространение получило гашение поля на постоянное [1] или нелинейное [2] разрядное сопротивление. Принцип действия данного метода приведен на рис. 1. При этом способе коммутационные аппараты, так называемые выключатели поля, замыкают обмотку возбуждения на разрядное сопротивление, после чего размыкают главные контакты. Вся энергия, запасенная в магнитном поле обмотки, выделяется в виде тепловой энергии на разрядном сопротивлении.

Данный способ гашения является надежным и недорогим решением, однако поле возбуждения затухает относительно медленно.

Нелинейное сопротивление (варистор), используемое в статических системах возбуждения генераторов большой мощности, представляет собой блоки, собранные из параллельно соединенных дисков карбида кремния SiC (рис. 2).

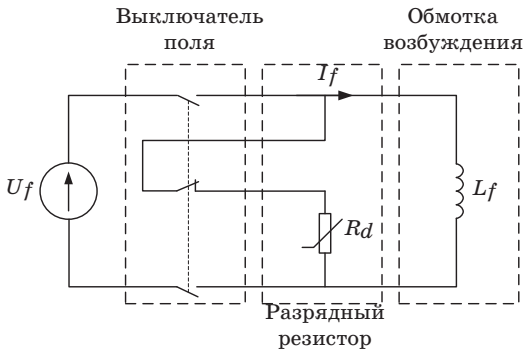

Рис. 1. Гашение поля на активное или нелинейное сопротивление

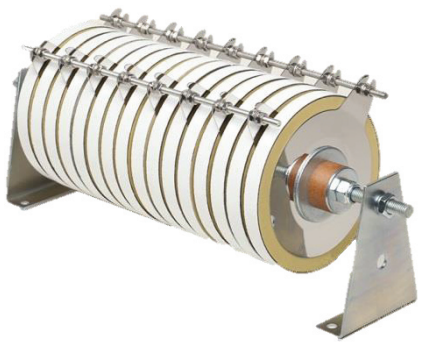

Рис. 2. Внешний вид блока SiC варисторов

а) б)

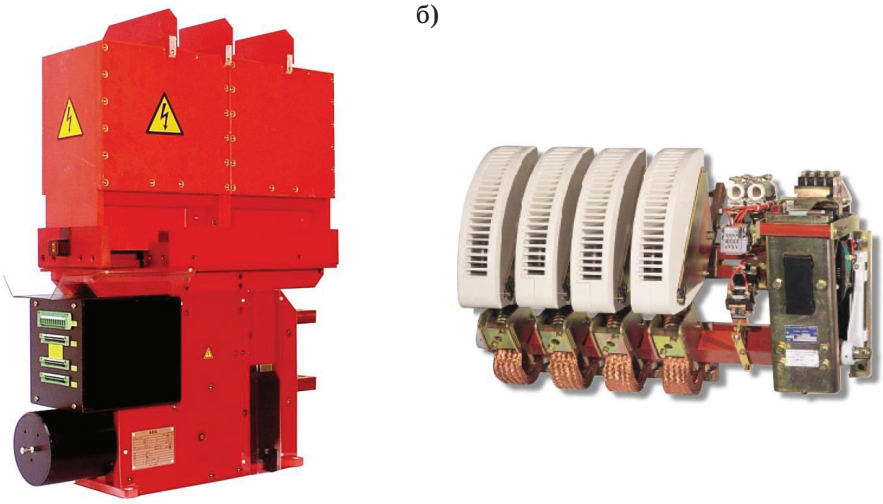

Рис. 3. Внешний вид выключателей поля: а – Gerapid (GE); б – CEX (Mersen)

Свойства нелинейных разрядных сопротивлений за последние 50 лет улучшились по сравнению с указанными в [1], однако время гашения поля на нелинейное сопротивление все еще превышает оптимальное [1]. Широкое применение варисторов на рынке Российской Федерации ограничивают высокая стоимость и длительные сроки поставки. Кроме того, цепи гашения (выключатель поля и варисторы) обладают значительными габаритными размерами и требуют квалифицированного обслуживания (рис. 3). Однако многие импортеры систем возбуждения применяют данное решение на объектах электроэнергетики Российской Федерации.

Гашение поля на дугогасительную решетку АГП

На территории Российской Федерации и стран СНГ широкое распространение получил метод гашения поля на дугогасительую решетку. Данный метод применяется в аппарате гашения поля (АГП) [1], выпускаемом филиалом ПАО «Силовые Машины» завода «Электросила». Кроме того, в 1960-х годах XX века технология изготовления АГП была освоена в КНР [4] и далее развивалась независимо от отечественной. Принцип действия показан на рис. 4. При этом способе энергия, запасенная в обмотке возбуждения, преобразуется в электрическую дугу, горящую на медных пластинах дугогасительной решетки, и далее в тепло.

К преимуществам применения АГП можно отнести компактные размеры и высокую скорость гашения поля, близкую к оптимальной. Скорость гашения поля является главным критерием, влияющим на снижение ущерба при внутренних коротких замыканиях синхронных генераторов.

К недостаткам АГП можно причислить сложность изготовления и отсутствие исполнений на низкие токи возбуждения. В [4] среди недостатков АГП указаны сложность обслуживания, однако обслуживание любого электрического аппарата занимает значительное время, а в некоторых случаях [5] и привлечение сертифицирован-

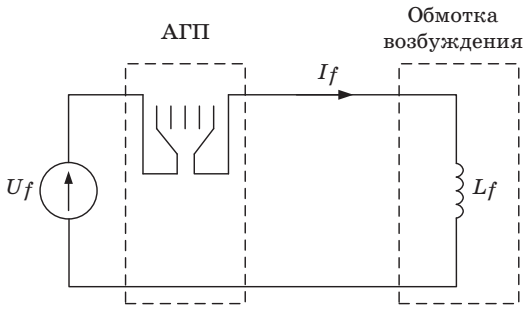

Рис. 4. Гашение поля на дугогасительную решетку

Рис. 5. Внешний вид АГП

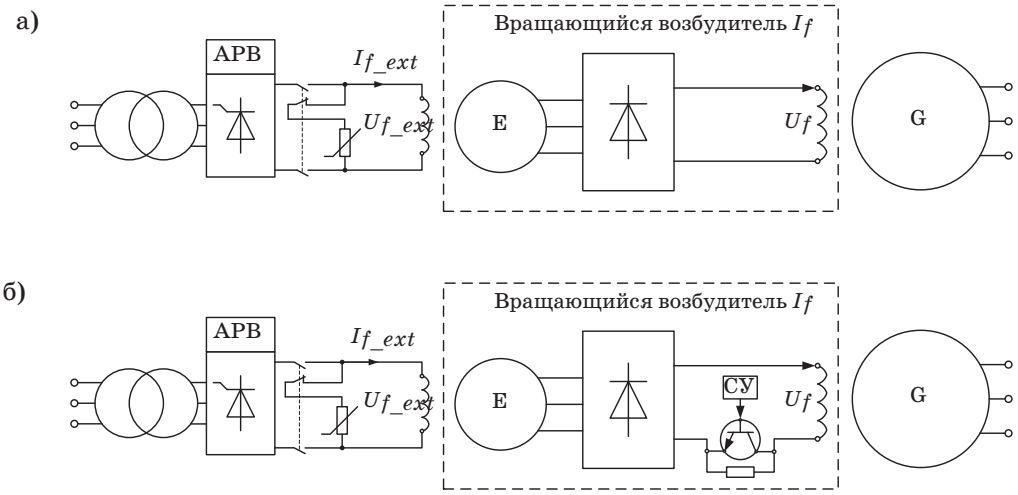

Рис. 6. Гашение поля бесщеточного генератора:
а – гашение поля только возбудителя; б – гашение поля возбудителя и генератора

ных специалистов завода-изготовителя с периодичностью раз в 5 лет.

В [3] отмечались отказы в работе АГП, произведенных в КНР. Однако за 60 лет применения АГП, выпускаемых филиалом ПАО «Силовые Машины» завода «Электросила», не было зафиксировано отказов во время гашения поля при соблюдении руководств по монтажу и эксплуатации (рис. 5).

Гашение поля генератора на вращающееся сопротивление

На протяжении последних 30 лет производители бесщеточных синхронных генераторов ищут эффективный способ гашения поля обмотки возбуждения. Известны решения, при которых цепи гашения устанавливались непосредственно во вращающихся возбудителях (рис. 6) [6, 7].

Данный способ обладает значительным преимуществом в скорости гашения поля, так как он воздействует непосредственно на поле генератора, а не возбудителя, но при реализации этого метода необходимо выполнить ряд сложных технических задач, среди которых:

1. Надежная передача сигнала управляющего воздействия на ключи вращающегося выпрямителя и цепей гашения;

2. Эффективный отвод тепла, выделяющегося при гашении поля синхронного генератора;

3. Обеспечение механической прочности полупроводниковых ключей и нелинейных сопротивлений (варисторов).

Ряд этих задач был частично решен в работе [7] для гидрогенератора мощности 20 МВА с частотой вращения 250 об/мин. Однако для внедрения данного способа гашения поля в турбогенераторах мощностью свыше 60 МВА и частотой вращения свыше 1500 об/мин эти задачи должны быть решены полностью.

Гашение поля возбудителя генератора на электрическую емкость

На протяжении более чем 60 лет в [1], [4] отмечалась перспективность гашения поля на электрическую емкость, но ограничивающим фактором являлось отсутствие конденсаторов необходимой емкости и напряжения. Однако современный уровень производства конденсаторов уже позволяет применять их для гашения поля возбудителей бесщеточных генераторов. Принцип действия показан на рис. 7.

Импульсы управления тиристорного выпрямителя блокируются, контакты выключателя поля размыкаются, и кратковременно подается сигнал на отпирание тиристора VS_d. В контуре обмотки возбуждения L_f и разрядного конденсатора C_d начинается колебательный разряд. При прохождении тока через ноль тиристор VS_d запирается, то есть за четверть периода колебаний вся магнитная энергия, запасенная в обмотке возбуждения, должна преобразоваться в электрическую энергию заряда конденсатора C_d.

Ток и напряжения на обмотке возбуждения приведены в формулах (1).

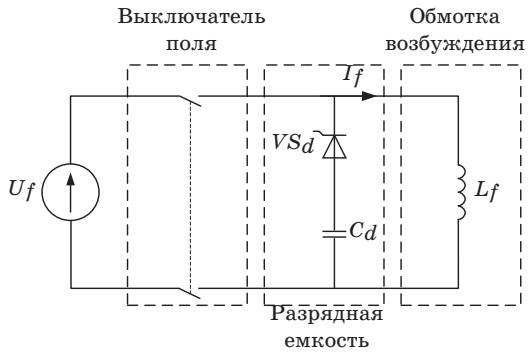

Рис. 7. Гашение поля на электрическую емкость

$$i_f(t) = I_f \cos\frac{t}{\sqrt{L_f C_d}};$$

$$u_f(t) = I_f\sqrt{\frac{L_f}{C_d}}\sin\omega t - U_f. \quad (1)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_f C_d}} = \frac{2\pi}{T};\ T = 2\pi\sqrt{L_f C_d}. \quad (2)$$

Величина разрядной емкости конденсатора определяется энергией, запасенной в обмотке возбуждения, и максимально допустимым напряжением на обмотке возбуждении U_m:

$$\frac{L_f I_f^2}{2} = \frac{C_d\left(U_m + U_f\right)^2}{2}; \quad (3)$$

$$C_d = L_f\frac{I_f^2}{\left(U_m + U_f\right)^2}. \quad (4)$$

Полное время гашения поля будет определяться формулой

$$t_m = \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2}\sqrt{L_f C_d} = \frac{\pi}{2}\frac{L_f I_f^2}{\left(U_m + U_f\right)^2}. \quad (5)$$

Приняв, что $I_f = U_f/r_f$, а $\tau = L_f/r_f$, получим:

$$t_m = \frac{\pi}{2}\tau\frac{U_f}{U_m + U_f}. \quad (6)$$

Разработана модель в *MatLab Simulink* щита возбуждения ЩВ45 с бесщеточным возбудителем БВД-240-3000, поставляемого ПАО «Силовые машины» для возбуждения турбогенератора ТЗФП802МУ3. Моделирование показывает, что в соответствии с требованиями [8] поле возбудителя БВД-240-3000 генератора ТЗФП802МУ3 из режима двукратной форсировки на холостом ходу может быть погашено за 0,196 τ при отношении U_m/U_f=7.

Данный метод, с одной стороны, позволяет экономить на мощности трансформатора возбуждения, так как величина обратного напряжения, прикладываемого к обмотке возбуждения, не зависит от мощности трансформатора возбуждения, с другой стороны, позволяет погасить поле с высокой скоростью. Элементы цепей гашения не требуют дорогостоящего технического обслуживания и обладают высокой надежностью.

Из недостатков данного метода можно отметить все еще высокую стоимость конденсаторов. Однако производство конденсаторов большой емкости развивается как за рубежом, так и в Российской Федерации, что позволит в будущем снизить стоимость конденсаторов и применять данный способ гашения поля возбудителей и синхронных генераторов.

Сравнение времени гашения поля различными способами

В таблице приведен сравнительный анализ продолжительности процесса гашения поля генератора на холостом ходу по сравнению с оптимальным временем гашения $t_{опт}$, определенным в [1].

Из результатов, приведенных в таблице, видно, что скорость гашения поля АГП является наиболее близкой к оптимальной, однако его применение в щите возбуждения с малыми номинальными токами невозможно.

Гашение на нелинейное сопротивление показывает хороший результат, но стоимость реализации данного метода не позволят широко применять его в РФ.

Метод гашения поля на электрическую емкость позволяет быстро погасить поля возбудителя, уменьшив тем самым и скорость гашения поля синхронного генератора. Применение конденсатора большой емкости в цепях гашения по-

Сравнение времени гашения поля различными способами

№	Способ гашения поля	Общее выражение t_m	t_m	$k=U_m/U_f$	$t_m/t_{опт}$
1	Оптимальные условия гашения поля	$\frac{1}{k+1}\tau$	0,125τ	7	1
2	АГП	$\ln\frac{k+1}{k}\tau$	0,134τ	7	1,07
3	Разрядка на нелинейное сопротивление	$\frac{5}{(5-1)(k+1)}\tau$	0,156τ	7	1,25
4	Разрядка обмотки на электрическую емкость	$\frac{\pi}{2(k+1)}\tau$	0,196τ	7	1,57
5	Разрядка на постоянное сопротивление	$\frac{4{,}65}{k+1}\tau$	0,582τ	7	4,65
6	Инвертирование тиристорного выпрямителя	$\ln\frac{k+1}{k}\tau$	0,693τ	1	5,55

ля упрощает изготовление и эксплуатацию системы возбуждения.

На сегодняшний день широкое применение этого метода гашения поля для статических систем возбуждения большой мощности ограничено отсутствием на рынке конденсаторов необходимой емкости и напряжения. Однако для небольших систем возбуждения вращающихся возбудителей турбогенераторов мощностью до 80 МВт требуется конденсатор относительно небольшой емкости до 2,2 мФ.

Библиографический список

1. *Брон О. Б.* Автоматы гашения магнитного поля // Библиотека по автоматике. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. Вып. 34. 138 с.

2. *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.

3. Disc Introduction // Metrosil. 2010. URL: https://www.metrosil.com/wp-content/uploads/2017/05/Metrosil-Exciter-Discharge-Applications.pdf (дата обращения: 07.11.2017).

4. *Xianming C., Wei W., Hongshui L., Guohua, Xiaodong Z.* New De-excitation Method for Large Hydraulic Generator // Journal of International Council on Electrical Engineering. 2011. Vol. 1. No. 2. Pp. 234–240.

5. High Speed DC Circuit Breaker Gerapid 2607, 4207, 6007, 8007 with arc chute 1X2, 1X4, 2X2, 2X3, 2X4 USER`S GUIDE // GE Consumer & Industrial GmbH. 2008. No. 1. URL: http://apps.geindustrial.com/publibrary/ checkout/S47183-e-01-2008?TNR=Installation%20and%20Instruction%7CS47 183-e-01-2008%7CPDF&filename=S47183-e-01-2008.pdf (дата обращения: 06.12.2017)

6. Asea Brown Boveri, Claes Ivarsson. Method and device fordemagnetizing brushless synchronous machines. Patent PCT/SE1993/000244 1993.

7. *Platero C. A., Redondo M., Blázquez F., Frías P.* High-speed deexcitation system for brushless synchronous machines // Electric Power Applications, IET. March 2012. Vol. 6. No. 3. Pp. 156, 161.

8. ГОСТ 21558-2000. Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. Общие технические условия. М., 2003. 19 с.

Научное издание

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ ’18

Сборник докладов

16–20 апреля 2018 г.

Ответственный за выпуск:
д-р техн. наук, профессор *В Ф. Шишлаков*

Редакторы: *В. С. Гончарова, Л. И. Корнеева*
Компьютерная верстка *А. Н. Колешко*

Подписано к печати 14.06.18. Формат 60 × 84 1/8.
Усл. печ. л. 32,0. Уч.-изд. л. 36,9. Тираж 150 экз. Заказ № 273.

Редакционно-издательский центр ГУАП
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67