

О.М. ГАЛИНОВСКИЙ, Е.М. ДУБЧАК, О.О. ЛЕНСКАЯ

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДІОДНИХ І ТИРИСТОРНИХ ЗБУДНИКІВ БЕЗЩІТКОВИХ СИНХРОННИХ МАШИН

Мета. Удосконалення методів розрахунку і порівняльного аналізу діодних і тиристорних збудників безщіткових синхронних машин, вибір методу управління тиристорними збудниками з мостовими схемами перетворення. **Методологія.** Показано зіставлення параметрів збудника безщіткової синхронної машини з параметрами моделі випрямляча в системі Micro-Cap. Параметри збудників безщіткового синхронного генератора потужністю 250 кВт порівнюються при використанні діодних мостових, мосто-нульових і тиристорних мостових випрямлячів з різними способами управління. Результати. Запропоновано спосіб керування системою збудження безщіткової синхронної машини на основі мостового тиристорного випрямляча, в якому збудження синхронної машини в робочих і форсировочних режимах контролюється тільки по ланцюгу збудження збудника з кутом управління тиристором $\alpha_u = 0 = \text{const}$, а кут управління тиристором змінюється тільки при переключенні випрямляча в режим інвертора. Система збудження характеризується високою якістю форми напруги навантаження, швидкодією регулювання при форсуванні збудження і гасіння поля, а також високими масогабаритними показниками збудника. Практичне значення. Розроблені методи розрахунку для діодних і тиристорних збудників безщіткових синхронних машин можуть бути застосовані при конструюванні.

Ключові слова: збудник, діод, тиристор, схема, безщітковий, синхронний, генератор

А.М. ГАЛИНОВСКИЙ, Е.М. ДУБЧАК, Е.А. ЛЕНСКАЯ

СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИОДНЫХ И ТИРИСТОРНЫХ ВОЗБУДИТЕЛЕЙ БЕСЩЕТОЧНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН

Цель. Усовершенствование методов расчета и сравнительного анализа диодных и тиристорных возбудителей бесщелочных синхронных машин, выбор метода управления тиристорными возбудителями с мостовыми схемами преобразования. **Методология.** показано сопоставление параметров возбудителя бесщелочной синхронной машины с параметрами модели выпрямителя в системе Micro-Cap. Параметры возбудителей бесщелочного синхронного генератора мощностью 250 кВт сравниваются при использовании диодных мостовых, мосто-нульовых и тиристорных мостовых выпрямителей с различными способами управления. **Результаты.** Предложен способ управления системой возбуждения бесщелочной синхронной машины на основе мостового тиристорного выпрямителя, в котором возбуждение синхронной машины в рабочих и форсировочных режимах контролируется только по цепи возбуждения возбудителя с углом управления тиристором $\alpha_u = 0 = \text{const}$, а угол управления тиристором изменяется только при переводе выпрямителя в режим инвертора. Система возбуждения характеризуется высоким качеством формы напряжения нагрузки, быстродействием регулирования при форсировке возбуждения и гашения поля, а также высокими массогабаритными показателями возбудителя. **Практическое значение.** Разработанные методы расчета для диодных и тиристорных возбудителей бесщелочных синхронных машин могут быть применены при конструировании.

Ключевые слова: возбудитель, диод, тиристор, схема, бесщелочный, синхронный, генератор

О.М. GALYNOVSKIY, Y.M. DUBCHAK, O.A. LENSKA

COMPARATIVE ANALYSIS OF DIODE AND THYRISTOR EXCITERS OF BRUSHLESS SYNCHRONOUS MACHINES

Purpose. Improvement of calculation methods and a comparative analysis of diode and thyristor exciters of brushless synchronous machines, the choice of a method for controlling thyristor exciters with bridge conversion circuits. **Methodology.** The matching of the exciter's parameters of a brushless synchronous machine with the parameters of the rectifier model in the Micro-Cap system is shown. The parameters of the exciters of a brushless synchronous generator with a power of 250 kW are compared using diode bridge, bridge-zero and thyristor bridge rectifiers with different control methods. **Results.** A method is proposed for controlling the excitation system of a brushless synchronous machine based on a bridge thyristor rectifier, in which the excitation of the synchronous machine in the operating and boosting modes is controlled only by the exciter circuit at the angle of thyristor control $\alpha_u = 0 = \text{const}$, and the thyristor control angle is changed only when rectifier transfer to inverter mode. The excitation system is characterized by a high quality of the load voltage form, fast-acting regulation during the excitation boost and field damping, and high weight and size indicators of the exciter. **Practical value.** The developed calculation methods for diode and thyristor exciters of brushless synchronous machines can be applied in the design.

Key words: exciter, diode, thyristor, conversion circuit, brushless, synchronous, generator

Введение. Возбудитель бесщелочной синхронной машины (БСМ) состоит из вращающегося полупроводникового выпрямителя в комплексе с источником переменного тока [3] – вспомогательной электрической машиной (ВЭМ).

Помимо требований, предъявляемых к системам возбуждения БСМ в целом (простота, надежность и другие), к возбудителям предъявляются два основных требования: быстродействие регулирования и высокое качество формы выходного напряжения [2].

В диодных возбудителях с мостовыми выпрямителями сравнительное хорошее качество формы выходного напряжения. Требуемая скорость форсировки возбуждения основной электрической машины (син-

хронной машины – СМ) достигается за счет повышения потолочного напряжения возбуждения ВЭМ. Однако при уменьшении напряжения на входе выпрямителя обмотка возбуждения СМ может оказаться замкнутой накоротко через вентили, при этом ток возбуждения СМ затухает за постоянной времени этой обмотки. Главный недостаток диодной системы возбуждения – медленное гашение поля СМ [2].

Тиристорная система возбуждения практически безинерционна. Она обеспечивает отрицательное напряжение на обмотке возбуждения СМ в переходных режимах за счет инверторного режима. Однако технико-экономические показатели тиристорных систем невысоки. Это связано с требованием обеспе-

чить форсировку тока возбуждения СМ с заданной кратностью. Поэтому при номинальной нагрузке ВЭМ работает с полным магнитным потоком при угле управления тиристорами $\alpha_u = 40 \div 60^\circ$, что приводит к ухудшению качества формы напряжения нагрузки. Главный недостаток тиристорной системы возбуждения – низкое качество формы напряжения нагрузки.

В работах [4, 5] приведены методики построения характеристик трехфазных и многофазных диодных выпрямителей в системе схемотехнического моделирования Micro-Cap, в работе [6] показан расчет характеристик тиристорного выпрямителя в зависимости от угла управления тиристорами.

В работе [4] показана методика расчета возбудителя с трехфазным мостовым выпрямителем, основанная на определении сопротивления нагрузки эквивалентной схемы выпрямителя по цепи источника питания. Методика отличается сравнительной простотой. Однако она не может быть применена для расчета многофазных возбудителей на базе диодных и тиристорных выпрямителей с разными схемами преобразования. Поэтому для проведения сопоставительного анализа диодных и тиристорных возбудителей необходимо совершенствование методики их расчетов.

Цель работы: совершенствование методик расчетов и сопоставительный анализ диодных и тиристорных возбудителей бесщеточных синхронных машин, обоснование способа управления тиристорными возбудителями с мостовыми схемами преобразования.

Общая характеристика возбудителей бесщеточных синхронных машин. Возбудители БСМ средней и большой мощности размещены в одном корпусе или вынесены за пределы корпуса СМ. Возбудители проектируются при известной конструкции БСМ, известных параметрах возбуждения СМ ($U_{fN} = U_{DN}$; $I_{fN} = I_{DN}$; $R_f = R_D$), особенностях конструкции возбудителя, коэффициенте увеличения результирующей ЭДС в режиме форсировки напряжения возбуждения ВЭМ ($k_f = E_{if}/E_{iN}$) и других величинах.

Для уменьшения длины лобовых частей и улучшения качества формы напряжения нагрузки число пар полюсов ВЭМ принимается больше числа пар полюсов СМ: $p_w = (2 \div 8) p$.

В возбудителях применяются диодные или тиристорные выпрямители с мостовыми, нулевыми или мосто-нулевыми схемами преобразования.

На рис. 2 показаны электрические схемы моделей диодного мостового и тиристорного мосто-нулевого выпрямителей в системе схемотехнического моделирования Micro-Cap. На рисунке: $V1, V2, V3$ – источники ЭДС; r_i, x_i – активные и индуктивные сопротивления источника питания (источника); R_d, L_d – активное сопротивление и индуктивность нагрузки выпрямителя.

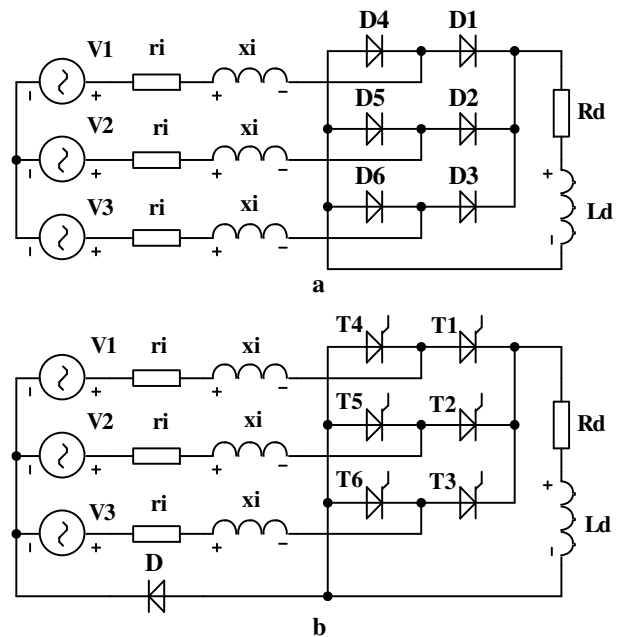


Рис. 2 – Электрические схемы диодного мостового (а) и тиристорного мосто-нулевого (б) выпрямителей

Диод D (рис. 1, б) позволяет при снятии сигнала с катодной группы тиристоров переходить с мостовой на нулевую схему преобразования [1].

В работах [4, 5] при сопоставительном анализе многофазных выпрямителей все характеристики строятся в системе относительных единиц нагрузки (о.е.н.) трехфазного мостового выпрямителя, в которой базовыми величинами приняты напряжение холостого хода и ток короткого замыкания выпрямителя:

$$U_{d0} = \frac{2\sqrt{6}}{\pi} \cdot E_i, \quad (1)$$

$$I_{dk} = \frac{\sqrt{2}E_i}{z_i}, \quad (2)$$

где E_i, z_i – ЭДС и полное сопротивление источника.

Все величины определяются в зависимости от тока нагрузки выпрямителя в о.е.н.

$$I_{d*} = I_d / I_{dk}, \quad (3)$$

В частности, определяются:

напряжение нагрузки в о.е.н.

$$U_{d*} = U_d / U_{d0}, \quad (4)$$

коэффициент связи между током нагрузки и действующим значением 1-ой гармоники тока источника

$$k_{i1} = I_d / I_{i1}, \quad (5)$$

коэффициент искажения тока источника

$$k_{is} = I_{i1} / I_i, \quad (6)$$

где I_i – действующие значения полного тока источника;

относительная величина полного сопротивления источника

$$M_Z = z_i / R_d, \quad (7)$$

Расчеты проводятся при заданной относительной величине активного сопротивления источника

$$k_r = r_i / x_i, \quad (8)$$

По результатам исследований [4, 5] установлена общая закономерность для m -фазных выпрямителей:

выпрямители с одинаковой схемой преобразования и одинаковыми величинами M_z и k_r подобны, они имеют практически одинаковые расчетные величины

k_{il} , k_{is} , U_d^* независимо от мощности, амплитуды и частоты ЭДС источника питания.

При одинаковых величинах M_z и k_r практически одинаковы относительные величины токов нагрузки и ЭДС возбудителя:

$$I_{i1Z} = I_{i1}/I_d; I_{iZ} = I_f/I_d; E_{iZ} = E/U_d. \quad (9)$$

Важным является анализ характеристик выпрямителя I_{i1Z} ; I_{iZ} ; $E_{iZ} = F(M_z)$ при разных величинах k_r .

Отметим кратко последовательность расчета возбудителей.

Вначале по результатам расчета модели выпрямителя в переходном режиме работы строим зависимости I_{i1Z} , I_{iZ} , $E_{iZ} = F(M_z)$ при разных значениях k_r . Определяем в реальном диапазоне изменения величины M_z средние значения величин I_{i1Zcp} , I_{iZcp} и E_{iZcp} , а также начальные значения токов ротора и результирующей ЭДС ВЭМ:

$$I_{i1} = I_{i1Zcp} \cdot I_{fN}; I_i = I_{iZcp} \cdot I_{fN}; E = E_{iZcp} \cdot U_{fN}. \quad (10)$$

Выполняем предварительный электромагнитный расчет ВЭМ, определяем начальные значения величин M_z и k_r , по которым рассчитываем модель выпрямителя в квазиустановившемся режиме работы. Определяем уточненные величины I_{i1} , I_i , E_{iZ} .

Корректируем длину магнитопровода ВЭМ, выполняем окончательный расчет возбудителя.

Тиристорные возбудители рассчитываются при номинальном угле управления тиристорами.

Проведем сопоставительный анализ трехфазных диодных и тиристорных возбудителей бесщеточного синхронного генератора (БСГ) мощностью 250 кВт (БСГ-250).

Число пар полюсов синхронного генератора (СГ) $p = 2$. Номинальные параметры возбуждения СГ:

$$U_{fN} = 54 \text{ В}; I_{fN} = 54 \text{ А}; R_f = 1 \text{ Ом}.$$

Применена синхронная вспомогательная электрическая машина (СВ) неявнополюсного типа.

На рис. 2 показано размещение возбудителя в корпусе БСГ.

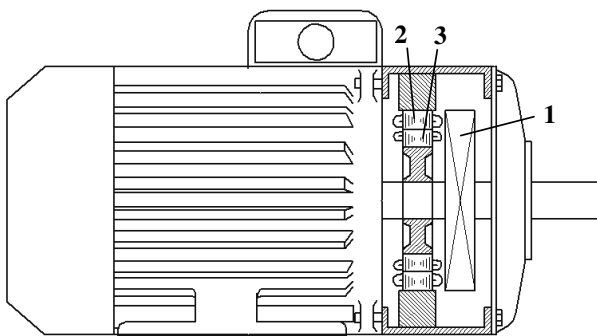


Рис. 2 – Размещение возбудителя в корпусе БСГ-250:
1 – выпрямитель; 2, 3 – статор и ротор СВ

Заданы параметры СВ: число пар полюсов $p_w = 8$; воздушный зазор $\delta = 1.2$ мм; применена сталь типа 2312; внешний диаметр магнитопровода статора $D_a = 369$ мм; коэффициент форсировки результирующей ЭДС $k_F = 2$.

Диодный возбудитель. На рис. 3 показаны зависимости I_{iZ} ; I_{i1Z} ; $E_{iZ} = f(M_z)$ модели трехфазного мостового выпрямителя при разных значениях величины k_r . Модель выпрямителя построена в системе Micro-Cap на диодах MR2510D.

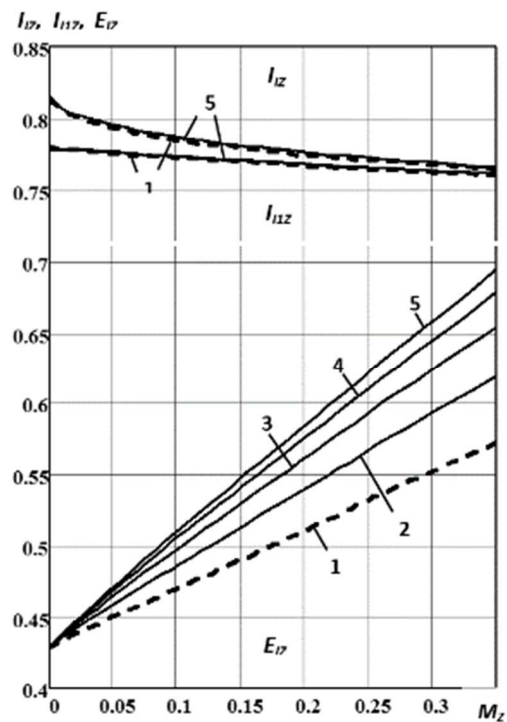


Рис. 3 – Зависимости трехфазного мостового выпрямителя E_{iZ} ; I_{iZ} ; $I_{i1Z} = f(M_z)$ при: 1 – $k_r=0$; 2 – $k_r=0.25$; 3 – $k_r=0.5$; 4 – $k_r=0.75$; 5 – $k_r=1$

Максимальный (теоретический) диапазон изменения параметров ротора трехфазного возбудителя с мостовым выпрямителем ограничен первым режимом работы выпрямителя при $M_z = 0 \div \pi/9$. Практически $M_z = 0.08 \div 0.26$. На этом диапазоне (рис. 3):

$$I_{i1Z} = 0.774 \div 0.762; I_{iZ} = 0.789 \div 0.769; E_{iZ} = 0.47 \div 0.63.$$

Средние значения величин:

$$I_{i1Zcp} = 0.768; I_{iZcp} = 0.779; E_{iZcp} = 0.55.$$

Наибольшие отклонения от средних значений:

$$\Delta I_{i1Z} = 0.91\%; \Delta I_{iZ} = 1.5\%; \Delta E_{iZ} = 17\%.$$

Начальные расчетные величины СВ по (10):

$$I_{i1N} = 41.5 \text{ А}; I_{iN} = 42 \text{ А}; E_{iN} = 29.7 \text{ В}.$$

В режиме форсировки $E_{iF} = k_F \cdot E_{iN} = 59.4 \text{ В}$.

Проводим электромагнитный расчет СВ при I_{i1N} , I_{iN} , E_{iN} , E_{iF} с учетом допустимых величин индукций на участках магнитной цепи в режиме форсировки. Определяем; размеры проводников; геометрию листов стали СВ; начальные расчетные величины M_z и k_r .

В дальнейших расчетах размеры проводников и геометрия листов стали СВ остаются неизменными. Уточняется только длина магнитопровода по уточненной величине E_{iN} .

Исследуем модель выпрямителя в квазиустановившемся режиме работы.

Параметры нагрузки модели:

$$U_{df} = 56 \text{ В}; I_{df} = 8 \text{ А}; R_{df} = 7 \text{ Ом}.$$

Начальные параметры источника питания находим с учетом начальных значений величин M_z и k_r .

Определяем уточненные значения величин I_{i1} , I_i , E_{iZ} , уточняем длину пакета магнитопровода ($l = 61$ мм), корректируем результаты расчета возбудителя.

Результаты расчета модели выпрямителя приведены на рис. 4. Параметры выпрямителя приведены в табл. 1.

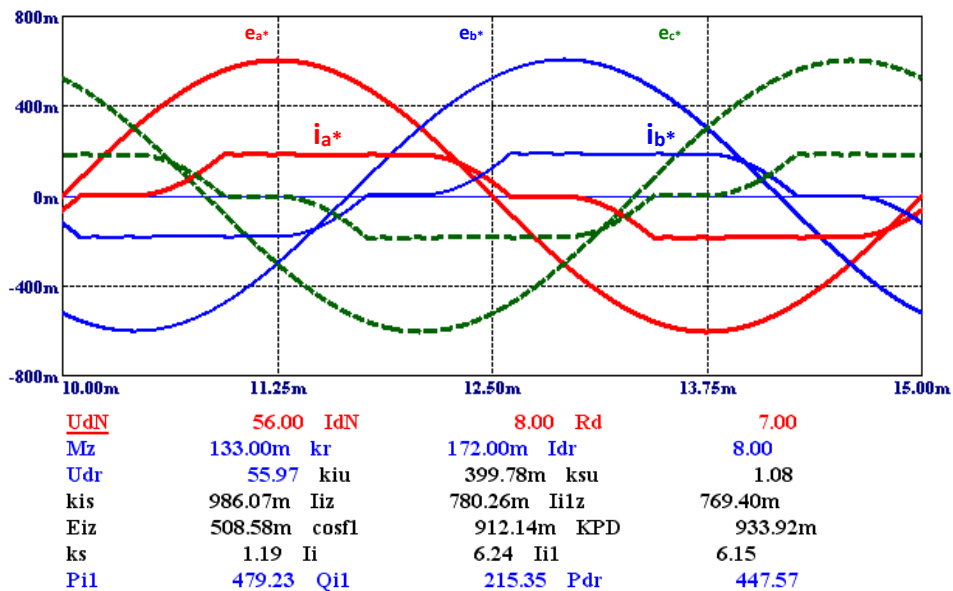


Рис. 4 – Результаты расчета модели диодного выпрямителя в квазиустановившемся режиме

Таблица 1 – Параметры диодных и тиристорных возбудителей БСГ-250 при $P_{fN} = 2916$ Вт, $U_f N = 54$ В, $I_f N = 54$ А

№ п.п.	Величина	Обозначение	Единицы измерений	Диодный мостовой выпрямитель	Тиристорный выпрямитель			
					мостовой			мостонулевой
1	Угол управления тиристорами	α_u	эл. гр.	-	0	60	47	20
2	Результирующая ЭДС СВ	$E_{\delta N}$	В	27.5	27.6	54.9	54.9	54.9
3	Ток ротора СВ	I_{i1}	А	42.1	42.2	43.7	43.5	30.6
4	Активная мощность СВ	P_{i1}	Вт	3122	3141	3155	3151	3075
5	Расчетная мощность СВ	S_p	ВА	3470	3493	7203	5371	5036
6	Потери в стали СВ	P_{Fe}	Вт	128.5	130.2	514	289	514
7	Потери на возбуждение СВ	P_f	Вт	206	207	773	433	509
8	Напряжение холостого хода	U_{d0}	В	64.2	64.2	64.2	64.2	64.2
9	Коэффициент высших гармоник напряжения нагрузки	k_{ku}	-	0.4	0.397	0.968	0.758	0.801
10	Коэффициент искажения напряжения нагрузки	k_{su}	-	1.077	1.076	1.392	1.255	1.281
11	Коэффициент искажения тока	k_{is}	-	0.986	0.986	0.963	0.967	0.686
12	Относительная величина полного тока источника	I_{iz}	-	0.78	0.78	0.809	0.805	0.567
13	Относительная величина 1-й гармоники тока источника	I_{i1z}	-	0.769	0.769	0.779	0.778	0.389
14	Относительная величина ЭДС	$E_{\delta z}$	-	0.509	0.511	1.017	1.017	1.017
15	Коэффициент мощности	cos ϕ_1	-	0.912	0.912	0.455	0.607	0.89
16	КПД выпрямителя	η	%	93.4	92.8	92.4	92.6	94.8
17	КПД возбудителя	η_f	%	84	83.5	65.4	75	70.9
18	Коэффициент увеличения расчетной мощности СВ	ks	-	1.19	1.198	2.47	1.84	1.728

Параметры СВ, согласованы с параметрами модели диодного выпрямителя:

$$M_z = 0.133; k_r = 0.172;$$

$$I_{iz} = 0.78; I_{i1z} = 0.769; E_{\delta z} = 0.509.$$

При расчете возбудителей учитываются потери на элементах схемы (источник питания, вентили, защитные цепи).

Методика расчета параметров трехфазных диодных и тиристорных возбудителей БСМ пригодна для расчета многофазных возбудителей с разными схемами преобразования и способами управления тиристорами.

Сопоставление диодных и тиристорных возбудителей. Сопоставим диодные и тиристорные возбудители БСГ-250. Сопоставление возбудителей проведено при применении СВ диодного возбудителя.

Модель тиристорного выпрямителя (ТВ) построена на тиристорах В25RIA120.

Возбудители с тиристорными мостовыми выпрямителями рассчитаны при разных номинальных углах управления тиристорами:

$$\alpha_{uN}=0; \alpha_{uN}=60^{\circ}; \alpha_{uN}=47^{\circ}.$$

При расчетах возбудителей используются характеристики моделей выпрямителей, рассчитанных для вышеуказанных углов управления.

Результаты расчетов тиристорных возбудителей приведены в табл. 1.

Работа тиристорного выпрямителя при $\alpha_u = 0 = \text{const}$ в рабочем и форсировочном режимах подобна работе диодного выпрямителя.

При регулировании напряжения нагрузки возбудителя с мостовым тиристорным выпрямителем только по углу управления тиристорами существенно ухудшается качество формы напряжения нагрузки, увеличиваются потери в стали СВ, уменьшается КПД возбудителя, увеличивается полная мощность возбудителя S_2 и номинальная мощность автоматического регулятора возбуждения P_{JB} .

При номинальном угле управления $\alpha_{uN} = 60^\circ$ потери в стали увеличиваются примерно в 4 раза.

Для уменьшения потерь в стали увеличивают длину активной части СВ, что приводит к дальнейшему увеличению относительного сопротивления источника M_z , а следовательно, к ухудшению качества напряжения нагрузки.

Технико-экономические показатели невысоки и в мостовом ТВ при $\alpha_{uN} = 47^\circ$ и в ТВ с мосто-нулевой схемой преобразования. Поэтому в тиристорной системе возбуждения БСМ целесообразно применять способ управления, при котором регулирование возбуждения СМ в рабочем и форсировочном режимах осуществляется только по цепи возбуждения СВ при угле управления тиристорами $\alpha_u = 0 = \text{const}$, а регулирование углом управления тиристорами осуществляется только при переводе выпрямителя в инверторный режим. Предлагаемый способ управления позволяет сочетать положительные свойства диодных и тиристорных систем возбуждения БСМ: высокое качество формы выходного напряжения; быстродействующее регулирование при форсировке возбуждения и гашении поля; малые габариты возбудителя.

Выводы.

1. Проведено совершенствование методики расчета диодных и тиристорных возбудителей с учетом результатов расчета моделей выпрямителей в системе схемотехнического моделирования.

2. Предложен способ управления мостовым тиристорным возбудителем БСМ, при котором регулирование возбуждения в рабочем и форсировочном режимах осуществляется только по цепи возбуждения возбудителя при угле управления тиристорами $\alpha_u = 0 = \text{const}$, а изменение угла управления осуществляется

только при переводе выпрямителя в инверторный режим. Возбудитель отличается высоким качеством формы напряжения нагрузки, быстродействием регулирования при форсировке и гашении поля, высокими массогабаритными показателями.

Список литературы

- 1 А.С. СССР 650197. Б.Н. Абрамович, С.Я. Гриншпан, А.И. Плакс. Способ управления мостовым тиристорным преобразователем / Опубликовано 28.02.79. - Бюллетень № 8.
- 2 Глебов И.А. Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин. - Ленинград: Наука, 1988. - 322 с.
- 3 ГОСТ 21558-2000. Межгосударственный стандарт. Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов // Общие технические условия, - Дата введения 2003-07-01
- 4 Галиновский А.М. Параметры и характеристики полупроводниковых выпрямителей вентильных генераторов // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. - 2012. - Вип. 88. - С. 47-55.
- 5 Галиновский А.М., Бабенко О.Ю., Ленская Е.А. Определение основных соотношений выпрямителей вентильных генераторов по результатам расчетов переходных процессов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Випуск 3/2012 (19). - С. 425 - 430.
- 6 Галиновский А.М., Ленская Е.А. Характеристики нереверсивных тиристорных выпрямителей бесконтактных синхронных машин в зависимости от угла управления // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Проблеми удосконалення електричних машин та апаратів. Теорія і практика. - Х.: НТУ «ХПІ» - 2015. - №42. - С. 23-26.

References (transliterated)

- 1 A.S. SSSR 650197. B.N. Abramovich, S.Ia. Grinshpan, A.I. Plaks. Sposob upravleniia mostovym tiristornym preobrazovatelem [A method for controlling a thyristor bridge converter]. Published on 28.02.79, Bulletin 8.
- 2 Glebov I. A. Scientific bases of systems designing of excitation of powerful synchronous machines - Leningrad: Science. - 1988. - 322 p. [Rus]
- 3 GOST 21558-2000. Interstate standard: Excitation system for turbogenerators, hydrogenerators and synchronous compensators. General specifications. - Date of introduction 2003-07-01.
- 4 Galinovskiy A.M. Parameters and characteristics of semi-conductor rectifiers of valve generators. Mountain electromechanics and automatics: scientific and technical collection. -2012. - release 88 - pp. 48-54. [Rus].
- 5 Galinovskiy A.M., Babenko O. U., Lenska E.A. Determination of the main rectifiers ratios of gated generators using the calculation results of transient modes. Electromechanical and energy saving systems. - Kremenchuk: KrNU. - 2012. - No 88. - pp. 425-430. [Rus].
- 6 Galinovskiy A.M., Lenskaya E.A. Features reversible thyristor contactless synchronous rectifier machines depending on the control angle. Bulletin of NTU «KhPI». Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice. - Kharkiv: NTU «KhPI». 2015. (1151) - No 42. - P. 23-26. - ISSN 2079-3944.

Поступила (received) 05.09.2019

Відомості про авторів / Сведения про авторов / About the authors

Галиновський Олександр Михайлович (Галиновский Александр Михайлович, Galynovskiy Alexander Mikhailovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», кафедра електромеханіки; м. Київ, Україна; e-mail: 040@gmail.com.

Дубчак Євген Михайлович (Дубчак Евгений Михайлович, Dubchak Evgeny Mikhailovich) – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», старший викладач кафедри електромеханіки; м. Київ, Україна; e-mail: edubchak@ukr.net.

Ленська Олена Олександрівна (Ленская Елена Александровна, Lenska Elena Alexandrovna) – Департамент поновлюваних джерел енергії і альтернативних видів палива, Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України, заступник директора; м. Київ, Україна; e-mail: A_Lenskay@ukr.net.