

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СХЕМ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В СОСТАВЕ ИСТОЧНИКОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

С.Г. Воронин, Н.В. Клиначев, А.М. Давлатов, Д.В. Пауков

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Рассматриваются схемы источников постоянного тока на основе многофазного синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и выпрямителя. Проведена оценка различных вариантов построения схем при изменении числа фаз от двух до десяти и способов соединения обмотки генератора: N -лучевая звезда или замкнутое кольцо из N секций. Доказано, что при прочих равных условиях по удельным электрическим потерям обмотки с малым числом фаз, от двух до четырёх, оказываются предпочтительней многофазных обмоток. Показаны преимущества замкнутых многофазных обмоток перед разомкнутыми обмотками как с точки зрения удельных электрических потерь, так и с точки зрения сохранения выходных характеристик при единичных отказах. С помощью математических моделей проведён анализ пульсаций выходного напряжения выпрямителя для различного числа фаз и различных схем соединения обмоток как в штатном режиме, так и при обрыве диодов в выпрямителе. Оценено влияние индуктивности обмотки генератора на величину пульсаций напряжения. Делается вывод о существенном преимуществе замкнутых обмоток перед разомкнутыми с точки зрения пульсаций выпрямленного напряжения.

Ключевые слова: синхронный генератор, постоянный магнит, пульсации выпрямленного напряжения, полупроводниковый выпрямитель, многофазная замкнутая или разомкнутая обмотка, удельные электрические потери в меди, работоспособность при отказах.

Постановка задачи исследования

Вариант построения источников постоянного тока по схеме синхронный генератор – преобразователь переменного тока в постоянный широко распространён в различных областях техники [1–6]. Особенно эффективной такая схема оказывается при использовании генераторов с возбуждением от постоянных магнитов, так как при этом удаётся создать бесконтактный компактный источник. В частности, такие схемы используются при создании электромеханических трансмиссий транспортных средств различного назначения, при создании источников постоянного напряжения или с последующим преобразованием источников переменного тока изменяемой частоты для промышленных устройств и т. д. [7, 8]. Наиболее распространённым вариантом построения такой схемы является применение трёхфазного генератора и двухполупериодного выпрямителя. Недостатком таких схем являются относительно высокие пульсации выпрямленного напряжения [9–11]. Для их ликвидации приходится использовать довольно громоздкие фильтры. Возможно также применение синусных выпрямителей [12–15], которые позволяют получить на выходе постоянное напряжение практически без пульсаций. Схемы и алгоритмы управления синусными выпрямителями достаточно сложны, требуют использования транзисторных ключей на полный выпрямленный ток и

напряжение, в итоге оказываются существенно дороже схем с неуправляемым выпрямителем. Другим недостатком трёхфазных схем является их чувствительность к отказу силовых элементов выпрямителя. Действительно, выход из строя силового диода или транзистора приводит к выходу из строя всего устройства.

Увеличение числа фаз генератора и выпрямителя позволяет устранить оба перечисленных недостатка. Поэтому многофазные установки с неуправляемым диодным выпрямителем используются в ответственных системах энергоснабжения с повышенными требованиями по надёжности, например в авиации [16]. Для выбора числа фаз чаще всего используют один наиболее наглядный критерий – допустимые пульсации напряжения. Хотя при одном и том же числе фаз генератора возможны различные варианты схем соединения его обмотки, которые могут влиять на суммарные электрические потери и пульсации выпрямленного напряжения не только в штатном режиме, но и при обрыве фазной обмотки или выпрямительного диода. Задачей настоящей статьи является оценка влияния числа фаз и схемы соединения обмотки генератора на электрические потери в генераторе и форму выпрямленного напряжения, на основе которой возможен выбор конкретного варианта схемы источника постоянного тока на основе синхронного двигателя.

Оценка энергетической эффективности схем соединения обмоток

Обмотки генератора разделим на две группы: замкнутые, соединённые в многоугольник (рис. 1а); разомкнутые, соединённые в звезду (рис. 1б).

Во всех случаях предполагается использование классического мостового выпрямителя (рис. 2а) с пульсирующим напряжением на выходе (рис. 2б).

Для качественного сравнения различных вариантов построения выпрямителей предположим, что выпрямитель работает на активную нагрузку (см. рис. 2а) и индуктивность обмотки генератора равна нулю. Влияние индуктивности оценим ниже при моделировании электрических цепей. Примем также, что максимальная ЭДС, т. е. ЭДС в середине межкоммутационного интервала (МКИ) диодного выпрямителя – U_{max} (точка 1) для всех схем одинакова. Тогда одинаковым будет и выпрямлен-

ный ток (I) в этой точке – 1. Запишем суммарные электрические потери в обмотке генератора выражением

$$\Delta P = I^2 r, \tag{1}$$

где r – внутреннее суммарное активное сопротивление обмотки генератора, зависящее от схемы её соединения.

Учитывая, что на каждом МКИ открыты только два диода выпрямителя, находящихся в стойках, связанных с выходными клеммами, на которых ЭДС сдвинуты на угол 180 градусов при чётном числе фаз (рис. 3а), или максимально приближены к нему при нечётном числе фаз (рис. 3б), найдём общее уравнение для r . В частности, при чётном N и замкнутой обмотке схема замещения будет иметь вид (рис. 4а), при нечётном N и замкнутой обмотке схема замещения имеет вид (рис. 4б). В соответствии с этими рисунками получим:



Рис. 1. Схема обмоток генератора: а – замкнутая; б – разомкнутая

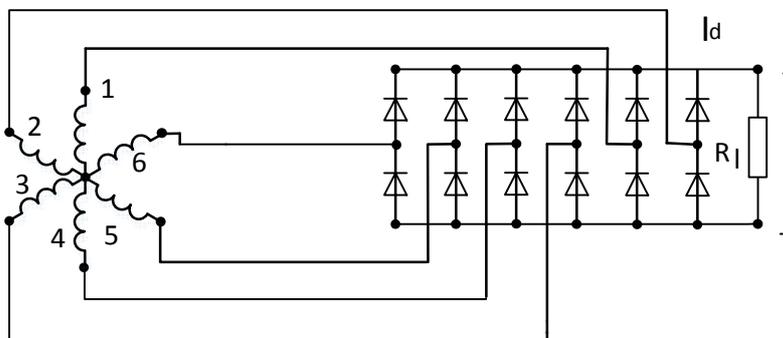


Рис. 2а. Схема мостового выпрямителя

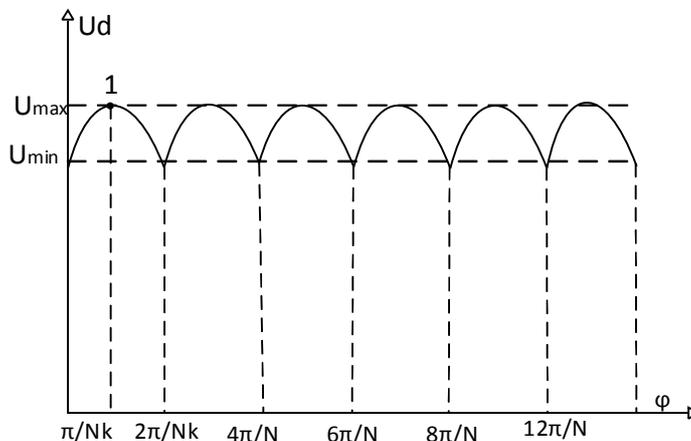


Рис. 2б. Диаграмма выпрямленного напряжения



Рис. 3. Схема соединения замкнутой обмотки генератора: а – при чётном N числе фаз, равном 6; б – при нечётном N числе, равном 5



Рис. 4. Схема замещения замкнутой обмотки генератора: а – при чётном N числе фаз; б – при нечётном N числе фаз

при чётном N

$$r = \frac{1}{4} N \cdot R, \tag{2a}$$

где R – активное сопротивление фазовой обмотки; при нечётном N

$$r = \frac{N^2 - 1}{4N} R. \tag{2б}$$

При разомкнутой обмотке к выходу выпрямителя оказываются подключёнными только две фазы, поэтому при чётном и нечётном N имеем

$$r = 2R. \tag{2в}$$

Если принять параметры фазовых обмоток для всех схем одинаковыми, т. е. считать, что они имеют одинаковое число витков, следовательно, одинаковое активное сопротивление и ЭДС, то окажется, что результирующая ЭДС на выходе выпрямителя для различных схем будет отличаться. Выражения для расчёта результирующей ЭДС достаточно просто получить путём суммирования векторов фазных ЭДС на участке между точками

подключения фазных обмоток через вентили к шинам постоянного тока (рис. 5).

Для этого согласно рис. 5а в случае замкнутой обмотки при чётном числе фаз может быть использовано выражение

$$E = E_1 \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}} \cos \varphi_n, \tag{3a}$$

а при нечётном согласно рис. 5б – выражение

$$E = E_1 \sum_{n=1}^{\frac{N-1}{2}} \cos \varphi_n, \tag{3б}$$

где φ_n – угол между векторами фазной ЭДС – E_n и результирующей ЭДС – E .

Для разомкнутой обмотки результирующая ЭДС является суммой ЭДС двух секций, подключённых к шинам выпрямителя. При чётном числе фаз очевидно, что это ЭДС двух противоположных секций:

$$E = 2E_1, \tag{3в}$$

а при нечётном числе фаз – это ЭДС секций, угол



Рис. 5. К определению модуля результирующего вектора ЭДС замкнутой обмотки: а – при чётном N числе фаз; б – при нечётном N числе фаз

Таблица преобразованных параметров генератора

N	E ₃ /E ₁	E _p /E ₁	r/R ₁		r'/r		r''/R ₁		δ	I _{зам}
			3	p	3	p	3	p		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	1	1,41	0,66	2	0,66	0,66	0,66	0,66	0,13	0,72
4	1,41	2,0	1,0	2	0,5	0,5	0,66	0,66	0,29	0,5
5	1,61	1,8	1,2	2	0,46	0,77	0,77	1,28	0,05	0,43
6	2,0	2,0	1,5	2	0,375	0,5	0,75	1,0	0,13	0,26
7	2,2	1,95	1,71	2	0,341	0,61	0,79	1,42	0,03	0,23
8	2,60	2	2	2	0,295	0,5	0,78	1,33	0,08	0,16
9	2,88	1,97	2,22	2	0,268	0,565	0,804	1,695	0,02	0,14
10	3,24	2	2,5	2	0,241	0,5	0,796	1,66	0,05	0,1

между которыми максимально приближен к 180 градусам:

$$E = 2E_1 \sin \frac{\pi}{N} (N - 1). \quad (3r)$$

В последних выражениях обозначено E₁ – ЭДС фазной обмотки, φ_n – угол между вектором фазной и результирующей ЭДС n-й фазы. Для того чтобы сделать результирующую ЭДС обмотки неизменной при любом количестве фаз и любой схеме их соединения, нам нужно менять число витков фазной обмотки в зависимости от схемы генератора. В качестве критерия изменения возьмём не только неизменность выходной ЭДС, но и для начала постоянство объёма меди в каждой фазе. Другими словами, если мы хотим изменить фазную ЭДС за счёт изменения числа витков обмотки при том же объёме меди фазной обмотки, то соответственно должны изменить её активное сопротивление. При этом, исходя из условия неизменного объёма меди, должно выполняться условие

$$\left(\frac{E_1}{E_1}\right)^2 = \frac{R_1}{R_1}, \quad (4a)$$

откуда получим активное сопротивление преобразованной фазной обмотки

$$R_1' = R_1 \left(\frac{E_1}{E_1}\right)^2,$$

где штрихом обозначим ЭДС и сопротивление фазы преобразованной обмотки. Соответственно изменится и полное сопротивление преобразованной обмотки:

$$r' = \left(\frac{E_1}{E_1}\right)^2 r. \quad (4б)$$

Результаты расчёта представлены в таблице, где цифры в первой колонке означают число фаз, а индексами «з» и «р» обозначена соответственно результирующая ЭДС, поделённая на фазную ЭДС замкнутой и разомкнутой обмотки (2-й и 3-й столбец). Исходное и преобразованное сопротивление замкнутой и разомкнутой обмоток представлены в столбцах 6 и 7 таблицы.

В результате проведённых преобразований с увеличением числа фаз мы увеличиваем общий объём меди, следовательно, и габариты генератора. Для сравнения различных вариантов схем обмоток нам необходимо привести все генераторы к

одному габариту. Возьмём в качестве базового – трёхфазный генератор. Тогда приведение можно осуществить через приведение числа фаз рассматриваемой обмотки к трём, т. е. коэффициент приведения равен

$$k = \frac{N}{3}. \quad (5)$$

В соответствии с этим отношением мы должны уменьшить объём меди в фазе при полученном ранее числе витков, чтобы оставить неизменным общий объём меди при увеличении числа фаз. Но пропорционально этому коэффициенту изменится и полное активное сопротивление приведённой обмотки:

$$r'' = k \cdot r' = \frac{N}{3} r'. \quad (6)$$

Результаты расчёта приведённого сопротивления обмоток приведены в столбцах 8 и 9. Энергетическую эффективность будем оценивать по величине электрических потерь (1). Учитывая, что мы приняли одинаковой для всех схем величину выходной ЭДС и выпрямленного тока, то в этом выражение необходимо подставить r''. Тогда, принимая во внимание, что величина выпрямленного тока для всех схем должна быть одинаковой, для сравнения энергетической эффективности достаточно сравнить величину приведённого сопротивления r''. Чем меньше r'', тем меньше потери.

Можно рассмотреть ещё один вариант реализации обмотки генератора – это две трёхфазные обмотки, сдвинутые на 30 электрических градусов. Её достоинством является возможность реализации 12-тактной коммутации [17–21]. Нетрудно заметить, что в этом случае полное активное сопротивление r' останется тем же, что и у стандартной трёхфазной обмотки, а приведённое активное сопротивление r'' удвоится по сравнению с ней, так как удвоилось число фаз.

Оценка пульсаций выпрямленного напряжения

Пульсации выпрямленного напряжения в штатном режиме согласно рис. 2б зависят от тактности коммутации выпрямителя (N_k), которая равна числу фаз (N_k = N) при чётном N и N_k = 2N при

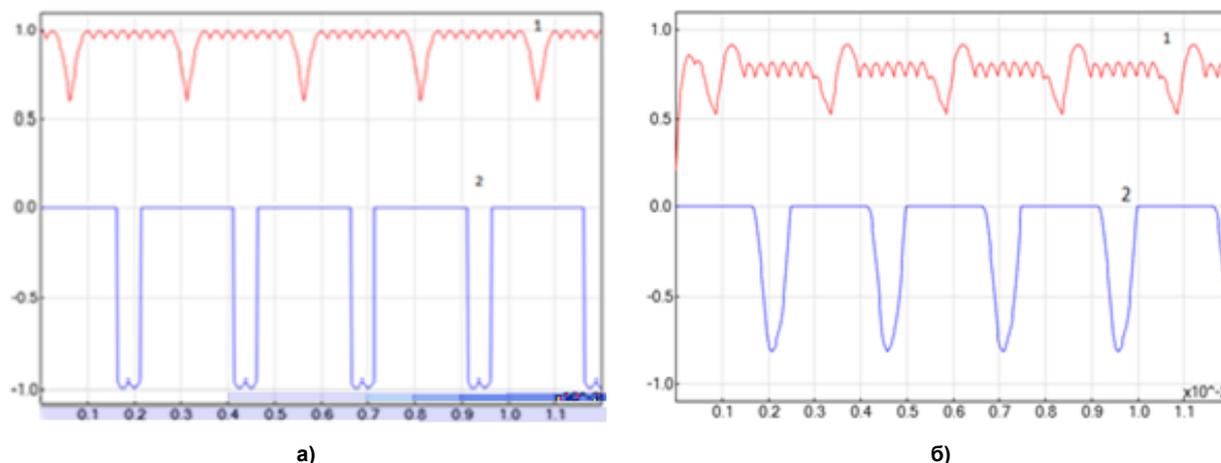


Рис. 6. Форма выпрямительного напряжения (1) и фазного тока (2) при обрыве диода выпрямителя в схеме с разомкнутой обмоткой: а – при нулевой индуктивности обмотки; б – при $T_s = T_n$

нечётном N . Величина пульсаций определяется выражением

$$\delta = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max}} = 1 - \cos \frac{\pi}{Nk}, \quad (7)$$

где E_{\max} – максимальное значение выпрямленного напряжения в середине МКИ, E_{\min} – минимальное значение выпрямленного напряжения по краям МКИ. Её численные значения приведены в таблице (столбец 9). Представленный критерий оценки пульсаций напряжения можно достаточно просто связать с другими известными критериями пульсаций [22].

На основании анализа результатов данных, представленных в таблице, можно сделать вывод о том, что минимальные электрические потери обеспечивают двухфазные и трёхфазные обмотки, замкнутые схемы многофазной обмотки имеют существенное преимущество перед разомкнутыми по этому показателю. При этом начиная с пяти фаз эквивалентное сопротивление замкнутой обмотки, определяющее электрические потери, при увеличении числа фаз изменяется незначительно. С точки зрения величины пульсаций напряжения предпочтительней обмотки с нечётным числом фаз.

Теперь рассмотрим нештатную ситуацию работы выпрямителя также на активное сопротивление. Под нештатной ситуацией будем понимать случай обрыва одного или двух диодов в одной стойке выпрямителя. Второй случай эквивалентен обрыву фазы генератора. Можно вывести аналитические выражения для оценки электрических потерь и пульсаций выпрямленного напряжения в этом случае при различном числе фаз и схемах соединения обмотки. Однако проще промоделировать указанную ситуацию и получить численные значения указанных параметров, на основании анализа которых сделать сравнительную оценку схем. Описание модели представлено, например, в [23]. В качестве объекта моделирования возьмём пятифазный двигатель и сначала рассмотрим случай разомкнутой обмотки. На рис. 6а представлена

диаграмма относительных значений выпрямленного напряжения (кривая 1) и тока фазной обмотки (кривая 2) при обрыве одного из связанных с ней диодов выпрямителя для случая $T_s = L/R = 0$, где L – индуктивность фазной обмотки. Диаграмма показывает, что даже при обрыве только одного диода пульсации напряжения оказываются довольно существенными. Результаты моделирования для этого случая и другого числа фаз приведены в таблице (столбец 11). Увеличение относительной индуктивности обмотки генератора уменьшает пульсации напряжения, но незначительно. На рис. 6б представлены те же диаграммы, но при значении электромагнитной постоянной обмотки $T_s = T_n$, где T_n – период частоты выходного напряжения генератора. Как следует из рис. 6б, даже такое большое относительное значение индуктивности практически не уменьшает пульсации выпрямленного напряжения. При отказе второго диода в той же стойке выпрямителя появится ещё один провал выпрямленного напряжения той же величины и сдвинутый относительно первого на 180 эл. градусов.

Теперь промоделируем замкнутую пятифазную обмотку. На рис. 7 представлены диаграмма выпрямленного напряжения и тока фазы генератора при нулевой индуктивности в исправном состоянии.

Пульсации тока в течение полупериода обусловлены тем, что число фаз в параллельных ветвях поочередно переходит от двух к трём и наоборот, от чего меняется активное сопротивление ветви, в которой находится фаза 5, следовательно, и ток через неё. При обрыве одной фазы форма выпрямленного напряжения не меняется, т. е. дополнительных пульсаций напряжения не появляется (рис. 8). Тем более их не будет и при обрыве диода выпрямителя. Это весьма существенное преимущество замкнутой обмотки. Форма тока в фазах при разрыве одной из них будет зависеть от положения фазы относительно неисправной. Если фаза

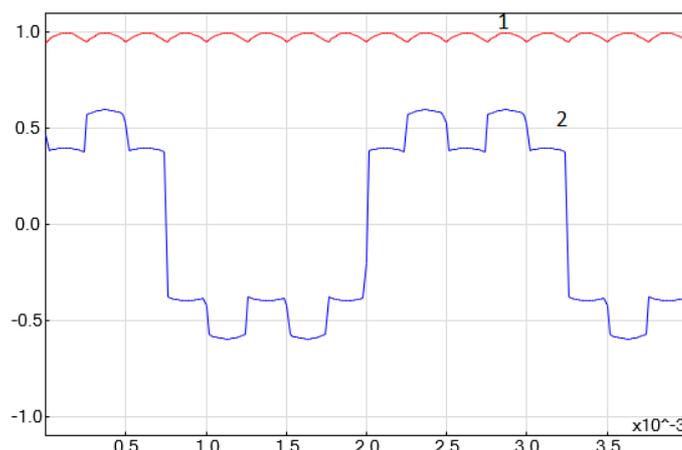


Рис. 7. Диаграмма выпрямленного напряжения и фазного тока в системе с пятифазным генератором и замкнутой обмоткой в исправном режиме

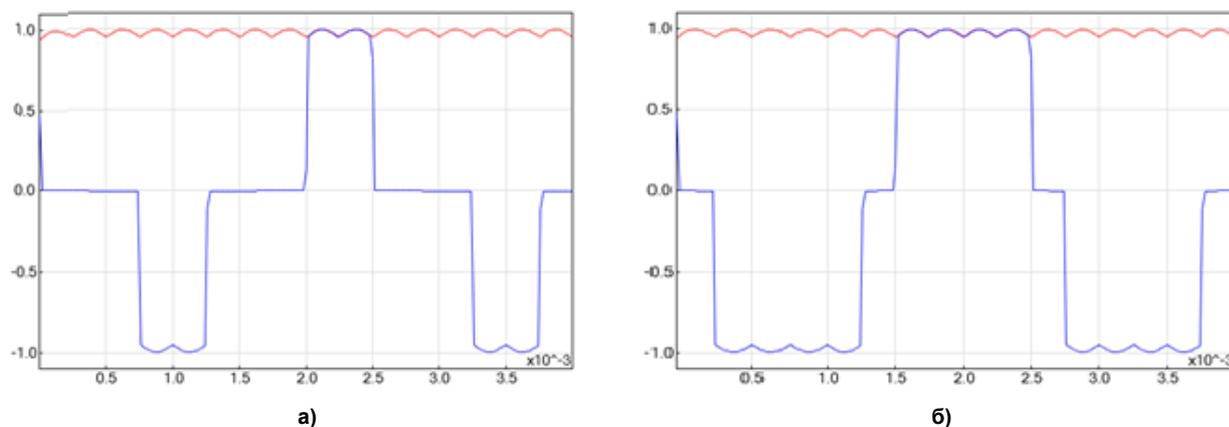


Рис. 8. Диаграмма выпрямленного напряжения и фазного тока в системе с пятифазным генератором и замкнутой обмоткой при разрыве одной фазы: а – в смежной фазе; б – через фазу

находится рядом с неисправной обмоткой, то форма её тока имеет вид рис. 8а. Если фаза находится через одну в общей системе чередования фаз, то форма тока имеет вид рис. 8б. Это обусловлено тем, что изменяется число тактов рабочего состояния фазы.

Выводы

По результатам исследования можно заключить.

1. Из всех вариантов построения источника постоянного тока на основе электромеханического генератора и двухполупериодного выпрямителя меньшие и одинаковые по величине относительные электрические потери в генераторе имеют варианты на основе двухфазного, трёхфазного и

шестифазного, со сдвигом фаз на 30 эл. градусов, генератора.

2. При дальнейшем увеличении числа фаз с точки зрения энергетических показателей предпочтение следует отдавать замкнутым обмоткам (см. таблицу).

3. С целью уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения целесообразно использовать генераторы с нечётным числом фаз.

4. Замкнутые обмотки оказываются предпочтительными и с точки зрения сохранения качества выпрямленного напряжения при разрыве диодов или фазной обмотки. Форма выпрямленного напряжения при указанных неисправностях остаётся неизменной, соответствующей штатному режиму.

Литература

1. Karbouj, H. Non-synchronous fast frequency reserves in renewable energy integrated power systems / H. Karbouj, Z.H. Rather, D. Flynn // *A critical review International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. – 2019. – No. 106. – P. 488–501. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.09.046

2. Review of frequency support control methods for asynchronous interconnection system based on VSC-HVDC 2019 / L. Zhu, Z. Yuan, C. Sheng et al. // *Electric Power Automation Equipment*. – 2019. – Vol. 39 (2). – P. 84–92.

3. *Decentralized model predictive control of voltage source converters for AC frequency containment* / L. Debry, M.S. Prevost, T. Panciatici et al. // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. – 2018. – No. 98. – P. 342–349. DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.12.015
4. *Автоматизированная мини-ГЭС как основа системы электроснабжения горных районов Таджикистана* / С.Г. Воронин, А.М. Давлатов, О.О. Султонов и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 100–107. DOI: 10.14529/power190311
5. *Gandzha, S. Design of Brushless Electric Machine with Axial Magnetic Flux Based on the Use of Nomograms* / S. Gandzha, D. Aminov, B. Kosimov // *Proceedings – 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon 2018)*. – 2018. – P. 282–287. DOI: 10.1109/uralcon.2018.8544320
6. *Application of Digital Twins Technology for Analysis of Brushless Electric Machines with Axial Magnetic Flux* / S. Gandzha, D. Aminov, I. Kiessh, B. Kosimov // *Proceedings – 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC – 2018)*. – 2018. – P. 8570132. DOI: 10.1109/glosic.2018.8570132
7. *Ганджа, С.А. Выбор оптимальной конструкции электродвигателя привода пильгерстана для технологии изготовления бесшовных труб* / С.А. Ганджа, Б.И. Косимов, Д.С. Аминов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 5–17. DOI: 10.14529/power190101
8. *Разработка инженерной методики расчета магнитных систем с постоянными магнитами на основе метода конечных элементов* / С.А. Ганджа, Д.С. Аминов, Б.И. Косимов, Р.Р. Ниматов // *Вестник ПНИПУ. Серия «Электротехника, информационные технологии, системы управления»*. – 2019. – № 29. – С. 58–74. DOI: 10.15593/2224-9397/2019.1.04
9. *Sohn, J. Alternator torque model based on equivalent circuit of synchronous generator for electric power management* / J. Sohn, S. Hong, M. Sunwoo // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2013. – No. 62 (8). – P. 3593–3602. DOI: 10.1109/tvt.2013.2266416
10. *Kabir, S.M. Brushless exciter model* / S.M. Kabir, R.L. Shuttleworth // *IEE Proceedings C: Generation Transmission and Distribution*. – 1994. – No. 141 (1). – P. 61–67. DOI: 10.1049/ip-gtd:19949704
11. *Brushless self-excited three-phase synchronous generator without exciter* / K. Inoue, H. Yamashita, E. Nakamae, T. Fujikawa // *Electrical Engineering in Japan*. – 1993. – No 113 (8). – P. 101–115. DOI: 10.1002/eej.4391130810
12. *Клиначев, Н.В. Линейная непрерывная динамическая модель реверсивного синхронно-векторного выпрямителя. Активный и пассивный режимы работы*. http://model.exponenta.ru/k2/Jigrein/dcs_20140628.htm (дата обращения: 20.10.2019).
13. *Воронин, С.Г. Электропривод летательных аппаратов: конспект лекций* / С.Г. Воронин. – Челябинск: ЧГТУ, 1995. – Ч. 1. – 110 с. – http://epla.susu.ru/glv_050.htm (дата обращения: 20.10.2019).
14. *Wang, B. Unity power factor control for three phase three level rectifiers without current sensors* / B. Wang, G. Venkataramanan, A. Bendre // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2007. – Vol. 43, no. 5. – P. 1341–1348. – http://www.ege.msu.edu/~bingen/files_publications/C-05_IAS.pdf (дата обращения: 15.03.2016). DOI: 10.1109/tia.2007.904433
15. *Dixon, J.W. Three-Phase Controlled Rectifiers* / J.W. Dixon // *Power Electronics Handbook*. – Academic Press, Harcourt Place, 32 Jamestown Road, London NW1 7BY, UK, www.academicpress.com, August 2001. – Chapter 12. – P. 183–196. – <http://web.ing.puc.cl/~power/paperspdf/dixon/21.pdf> (дата обращения: 15.03.2016).
16. *Бут, Д.А. Бесконтактные электрические машины: учеб. пособие для электромех. и электроэнерг. спец. вузов* / Д.А. Бут. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1990. – 416 с.
17. *Toulabi, M.S. Experimental comparison between the electric efficiencies of two different types of switched reluctance generators* / M.S. Toulabi, H. Torkaman, E. Afei // *2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, PEDSTC – 2011*. – 5742408. – P. 157–162. DOI: 10.1109/pedstc.2011.5742408
18. *Research of field magnetic motive force of non-salient pole synchronous generator with field windings inter-turn short circuit* / J. Hou, H. Li, J. Li, J. Hu // *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*. – 2010. – Vol. 30 (SUPPL.). – P. 220–225.
19. *Fahn, C.-S. Development of a data glove with reducing sensors based on magnetic induction* / C.-S. Fahn, H. Sun // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2005. – No. 52 (2). – P. 585–594. DOI: 10.1109/tie.2005.844259
20. *Afei, E. Comparison of two types of dual layer generator in field assisted mode utilizing 3D-FEM and experimental verification* / E. Afei, H. Torkaman // *Progress in Electromagnetics Research*. – 2010. – No. 23. – P. 293–309. DOI: 10.2528/pierb10060808
21. *Гомберг, Б.Н. Пульсации выпрямленной ЭДС вентильного генератора* / Б.Н. Гомберг, А.И. Согрин, Н.Н. Мехваник // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 97–106. DOI: 10.14529/power190211
22. *Балагуров, В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока: учеб. пособие для студентов вузов* / В.А. Балагуров. – М.: Высшая школа, 1982. – 272 с.
23. *Клиначев, Н.В. Многофазный выпрямитель – звезда* / Н.В. Клиначев. – http://model.exponenta.ru/k2/Jigrein/md_152.htm (дата обращения: 20.10.2019).

Воронин Сергей Григорьевич, д-р техн. наук, профессор кафедры «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; voroninsg@susu.ru.

Клиначев Николай Васильевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; klinachevnn@susu.ru.

Давлатов Азамджон Махмадиевич, аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; davlatov_azam@bk.ru.

Пауков Дмитрий Викторович, соискатель кафедры «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; paukovdv@rambler.ru.

Поступила в редакцию 24 октября 2019 г.

DOI: 10.14529/power200311

COMPARATIVE ASSESSMENT OF SYNCHRONOUS GENERATORS WINDINGS AS A PART OF DC SOURCE CONNECTION SCHEMES

S.G. Voronin, voroninsg@susu.ru,
N.V. Klimachev, klinachevnn@susu.ru,
A.M. Davlatov, davlatov_azam@bk.ru,
D.V. Paukov, paukovdv@rambler.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The article deals with the schemes of DC sources based on a multiphase synchronous generator with excitation from permanent magnets and a rectifier. It evaluates various options for constructing circuits with the number of phases changing from two to ten along with the different generator windings connections, i.e. N -beam star and a closed ring of N sections. It is proved that, ceteris paribus compared to multiphase windings in terms of specific electric losses, windings with a small, i.e. 2 to 4, number of phases are preferable. The advantages of closed multiphase windings compared to open windings in terms of specific electric losses and maintaining output characteristics during single failures. Mathematical models were used to analyze the ripple of the rectifier output voltage for a different number of phases and various schemes of the windings connection, both in the normal mode and with the faulty rectifier diodes. The influence of the inductance of the generator winding on the value of voltage ripples is estimated. The authors make a conclusion that the closed windings are significantly more preferable as far as the rectified voltage ripples are concerned.

Keywords: synchronous generator, permanent magnet, pulsed rectified voltage, semiconductor rectifier, multiphase closed or open winding, specific electrical losses in copper, operability in case of failures.

References

1. Karbouj H., Rather Z.H., Flynn D. Non-synchronous fast frequency reserves in renewable energy integrated power systems. *A critical review International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2019, no. 106, pp. 488–501. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.09.046
2. Zhu L., Yuan Z., Sheng C., Liu Z., Guo J. Review of frequency support control methods for asynchronous interconnection system based on VSC-HVDC 2019. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, vol. 39 (2), pp. 84–92.
3. Debry L., Prevost M.S., Panciatici T., Van P., Cutsem T. Decentralized model predictive control of voltage source converters for AC frequency containment apangelis. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2018, no. 98, pp. 342–349. DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.12.015
4. Voronin S.G., Davlatov A.M., Sultonov O.O. et al. [Automated mini-hydroelectric power station as the basis of the power supply system of mountainous regions of Tajikistan]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. "Power Engineering"*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 100–107. DOI: 10.14529/power190311. (in Russ.)
5. Gandzha S., Aminov D., Kosimov B. Design of Brushless Electric Machine with Axial Magnetic Flux Based on the Use of Nomograms. *Proceedings – 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon 2018)*, 2018, pp. 282–287. DOI: 10.1109/uralcon.2018.8544320
6. Gandzha S., Aminov D., Kiessh I., Kosimov B. Application of Digital Twins Technology for Analysis of Brushless Electric Machines with Axial Magnetic Flux. *Proceedings – 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC – 2018)*, 2018, pp. 8570132. DOI: 10.1109/glosic.2018.8570132
7. Gandzha S., Kosimov B., Aminov D. [Selection of the optimal design of the Pilgerstan drive electric motor for the seamless pipe manufacturing technology]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. "Power Engineering"*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 5–17. DOI: 10.14529/power190101. (in Russ.)

8. Gandzha S.A., Aminov D.S., Kosimov B.I., Nimatov P.P. Development of an engineering technique for calculating magnetic systems with permanent magnets based on the finite element method]. *Vestnik PNIU. Seriya "Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya"* [PNRPU Bulletin. Series "Electrical Engineering, Information Technology, Control Systems"], 2019, no. 29, pp. 58–74. (in Russ.) DOI: 10.15593/2224-9397/2019.1.04
9. Sohn J., Hong S., Sunwoo M. Alternator torque model based on equivalent circuit of synchronous generator for electric power management. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, no. 62(8), pp. 3593–3602. DOI: 10.1109/tvt.2013.2266416
10. Kabir S.M., Shuttleworth R.L. Brushless exciter model. *IEE Proceedings C: Generation Transmission and Distribution*, 1994, no. 141 (1), pp. 61–67. DOI: 10.1049/ip-gtd:19949704
11. Inoue K., Yamashita H., Nakamae E., Fujikawa T. Brushless self-excited three-phase synchronous generator without exciter. *Electrical Engineering in Japan*, 1993, no. 113 (8), pp. 101–115. DOI: 10.1002/ej.4391130810
12. Klinachev N.V. *Lineynaya nepreryvnaya dinamicheskaya model' reversivnogo sinkhronno-vektornogo vypryamitelya. Aktivnyy i passivnyy rezhimy raboty* [[Linear continuous dynamic model of a reversible synchronous vector rectifier. Active and passive operation modes]. Available at: http://model.exponenta.ru/k2/Jigrein/des_20140628.htm (accessed 20.10.2019).
13. Voronin S.G. *Elektroprivod letatel'nykh apparatov: konspekt lektsiy* [Electric drive of aircraft: Lecture notes]. Chelyabinsk: ChGTU, 1995, part 1. – 110 p. Available at: http://epla.susu.ru/glv_050.htm (accessed 15.03.2016).
14. Wang B., Venkataramanan G., Bendre A. Unity power factor control for three phase three level rectifiers without current sensors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2007, vol. 43, no. 5, pp. 1341–1348. Available at: http://www.egr.msu.edu/~bingsen/files_publications/C-05_IAS.pdf (accessed 15.03.2016). DOI: 10.1109/tia.2007.904433
15. Dixon J.W. Three-Phase Controlled Rectifiers. Chapter 12 in "Power Electronics Handbook", Academic Press, Harcourt Place, 32 Jamestown Road, London NW1 7BY, UK, www.academicpress.com, August 2001, pp. 183–196. Available at: <http://web.ing.puc.cl/~power/paperspdf/dixon/21.pdf> (accessed 15.03.2016).
16. But D.A. *Beskontaktnyye elektricheskiye mashiny: ucheb. posobiye* [Contactless electrical machines: manual for the specialty electromechanics and electrical power engineering]. 2nd ed. Moscow, Vysshaya shkola, 1990. 416 p.
17. Toulabi M.S., Torkaman H., Afjei E. [Experimental comparison between the electric efficiencies of two different types of switched reluctance generators]. *2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, PEDSTC – 2011*, 5742408, pp. 157–162. DOI: 10.1109/pedstc.2011.5742408
18. Hou J., Li H., Li J., Hu J. Research of field magnetic motive force of non-salient pole synchronous generator with field windings inter-turn short circuit. *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 2010, vol. 30 (SUPPL.), pp. 220–225.
19. Fahn C.-S., Sun H. Development of a data glove with reducing sensors based on magnetic induction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2005, no 52 (2), pp. 585–594. DOI: 10.1109/tie.2005.844259
20. Afjei E., Torkaman H. Comparison of two types of dual layer generator in field assisted mode utilizing 3D-FEM and experimental verification. *Progress in Electromagnetics Research*, 2010, no 23, pp. 293–309. DOI: 10.2528/pierb10060808
21. Gomberg B.N., Sogrin A.I., Mehvanik N.N. Ripple of Rectified EMF in Alternators. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 97–106. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190211
22. Balagurov, V.A. *Proyektirovaniye spetsial'nykh elektricheskikh mashin peremennogo toka: ucheb. posobiye* [Designing Specialty AC Electric Machines: A Study Guide]. Moscow, Vysshaya shkola, 1982, 272 p.
23. Klinichayev N.V. *Mnogofaznyy vypryamitel' – zvezda* [Multiphase rectifier – star]. Available at: http://model.exponenta.ru/k2/Jigrein/md_152htm (accessed 20.10.2019).

Received 24 October 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Сравнительная оценка схем соединения обмоток синхронных генераторов в составе источников постоянного тока / С.Г. Воронин, Н.В. Клиначев, А.М. Давлатов, Д.В. Пауков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 110–118. DOI: 10.14529/power200311

FOR CITATION

Voronin S.G., Klimachev N.V., Davlatov A.M., Paukov D.V. Comparative Assessment of Synchronous Generators Windings as a Part of DC Source Connection Schemes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 110–118. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200311