

УДК 621.314.263

А. Г. Воронцов ООО «НПЦ СЭС»

М. В. Пронин, А. Р. Мамутов ПАО «Силовые машины»

А. С. Григорян Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Модели IGBT-преобразователей переменно-постоянного напряжения с 3-, 5- и 7-фазно-трехфазными трансформаторами

Рассмотрены статические преобразователи переменно-постоянного напряжения (ППН), построенные на основе IGBT-инверторов напряжения (АИН), широтно-импульсных преобразователей напряжения (ШИП) и трансформаторов. Дано описание комплекса моделей ППН. Представлено математическое описание многофазно-трехфазного трансформатора с вращающимся магнитным полем (ТВП), в том числе с 5- или 7-фазной первичной обмоткой и 3-фазной вторичной обмоткой. Описана модель ППС с ШИП, АИН, ТВП и LCLфильтром, построенная по методологии расчета систем по взаимосвязанным подсистемам. При моделировании использованы виртуальные регулируемые источники переменного напряжения, позволившие разделить систему на взаимосвязанные части, упростить математическое описание установки, обеспечить устойчивость вычислительных процессов. Приведены результаты расчетов электромагнитных процессов в ППН, подтверждающие адекватность методов моделирования и разработанных моделей.

Полупроводниковый преобразователь, автономный инвертор напряжения, широтно-импульсный преобразователь, трансформатор с вращающимся полем, 5-фазная обмотка, моделирование

Преобразователи переменно-постоянного напряжения на модулях IGBT применяются во многих областях техники. С их помощью в электроэнергию преобразуется энергия солнца [1] и ветра [2]. В электромобилях энергия аккумуляторных батарей (АБ) преобразуется в механическую энергию с помощью ППН [3]. Для зарядки АБ используются стационарные ППН [4]. На электростанциях АБ и ППН используются как аварийные источники [5], [6]. В некоторых случаях ППН преобразуют постоянное напряжение в переменное, в других – переменное в постоянное. В ряде применений ППН обратимы и передают энергию в двух направлениях.

В зависимости от области применения ППН могут содержать автономный инвертор напряжения (АИН), широтно-импульсный преобразователь постоянного напряжения (ШИП), трансформатор (Тр), электрическую машину (ЭМ) и другие устройства. В простейшем случае ППН может быть построен по схеме рис. 1, в соответствии с которой ППН содержит АИН, Тр и *LC*-фильтр постоянного напряжения. Тр используется для гальванической развязки электросетей постоянного и переменного напряжений. При передаче энергии из цепи постоянного напряжения в сеть переменного напряжения АИН работает в режиме инвертора. Если направление передачи энергии изменяется, то АИН переходит в режим работы активного выпрямителя (АВ) с поддержанием заданного выпрямленного напряжения или тока.

При работе АИН в режиме синусоидальной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) наибольшее напряжение обмотки трансформатора со стороны АИН (~U) сравнительно мало и при мощных АИН существуют трудности в создании таких систем.



Для снижения стоимости ППН используется ШИП (рис. 2). ШИП позволяет повысить входное напряжение АИН по сравнению с напряжением АБ (a – схема ППН с ШИП, δ – схема ППН с АИН, s – схема ППН с Тр). Это приводит к существенному упрощению разработки АИН и трансформатора. При этом несмотря на введение в состав ППН дополнительных элементов общее количество модулей IGBT в ППН обычно уменьшается.



В зависимости от типа ШИП активная мощность *P* может передаваться из цепи постоянного напряжения в цепь переменного напряжения или в обратном направлении (рис. 2, *a*-*в*).

В схеме на рис. 2 АИН и ШИП однотактные. Для ППН большой мощности при низких напряжениях используются многотактные преобразователи. Схема ППН с четырехтактным ШИП и шестифазно-трехфазным трансформатором традиционного исполнения представлена на рис. 3.



В зависимости от мощности ППН можно выполнять АИН с числом фаз 3, 6 и др. В ряде слу-

чаев целесообразны 5 или 7 фаз с использованием трансформаторов с вращающимся магнитным полем (ТВП). Схемы с ППН и ТВП представлены на рис. 4.



В схеме на рис. 4, *а* многофазная обмотка ТВП соединена в многоугольник и имеет низкое напряжение, в схеме на рис. 4, *б* многофазная обмотка соединена в звезду и имеет повышенное напряжение, что позволяет использовать АИН на меньшие токи при возможном уменьшении количества IGBT-модулей.

Создание комплекса моделей ППН. Для разработки систем с ППН создан комплекс моделей для электромагнитных расчетов [6]–[9]. Из методов математического описания подобных установок можно выделить методологию моделирования систем по взаимосвязанным подсистемам, которая позволяет создавать модели, работающие с минимальными затратами машинного времени [7]. В разработанном комплексе моделей установок с электрическими машинами, полупроводниковыми преобразователями и трансформаторами представлены математические описания многих элементов систем. При этом отсутствуют описания 5- и 7-фазных электрических машин и ТВП, которые используются или могут быть применены в различных установках [10]. В данной статье поставлена задача математического описания и моделирования систем с ППН с ШИП и многофазными ТВП.

Моделирование ППН с ШИП и ТВП. В качестве примера моделирования ППН рассматривается модель системы с многотактным ШИП, многофазным АИН и ТВП. Упрощенная расчетная схема этого ППН с источником постоянного напряжения и трехфазной нагрузкой представлена на рис. 5. Источник со стороны ШИП имеет







напряжение u_a , ток i_a , индуктивность L_a и внутреннюю ЭДС e_a . Трехфазная электросеть имеет напряжения u_{sn} , токи i_{sn} , индуктивности L_s , ЭДС e_{sn} (n = 1-3) фаз. В ППН предусмотрены LC-фильтры со стороны постоянного и переменного напряжений.

При моделировании установки рис. 5 ее разделяют на подсистемы, связанные друг с другом зависимыми источниками напряжения и тока. На первом этапе емкость C_2 заменяется зависимым источником напряжения u_{C_2}

$$u_{C_2} = \frac{1}{C_2} \int i_{C_2} dt \,, \tag{1}$$

где t – время; i_{C_2} – ток в емкости C_2 .

Источник u_{C_2} переносится в другие ветви постоянного напряжения АИН и ШИП. Разность тока ШИП i_{ds} и АИН i_{di} образует ток в емкости C_2

$$i_{C_2} = i_{ds} - i_{di}$$
. (2)

Преобразования (1) и (2) позволяют разделить расчетную схему ППН на подсхемы (рис. 6 – подсхемы ППН с ШИП, пятифазным АИН и ТВП).

Подсхема с ШИП разделяется на взаимосвязанные части путем замены емкости C₁ зависимым источником напряжения

$$u_{C_1} = \frac{1}{C_1} \int i_{C_1} dt \,. \tag{3}$$

Источник u_{C_1} переносится в ветвь источника питания и в ветвь входного тока ШИП. Разность тока источника питания i_a и входного тока ШИП i_d образует ток емкости C_1

$$i_{C_1} = i_a - i_d$$
 (4)

Преобразования (3) и (4) позволяют разделить подсхему с ШИП на три (рис. 7).



Подсхема с АИН, ТВТ и нагрузкой рис. 6 также может быть разделена на взаимосвязанные части заменой трехфазной системы емкостей трехфазной системой зависимых источников напряжения с последующим переносом этих источников в другие ветви схемы (рис. 8).

В схеме рис. 9 в трехфазном конденсаторном фильтре напряжений ТВП учтены «паразитные» индуктивности L_{C_3} и активные сопротивления R_{C_3} .

Преобразование схемы рис. 8 часто приводит к неустойчивости процесса вычислений. Емкости C_3 и их токи обычно малы, значения этих токов соизмеримы с погрешностями определения токов в фазах трансформатора и нагрузки. Токи в кон-



Puc. 9

 u_{vn}



Puc. 10

денсаторах определяются как разности токов трансформатора и нагрузки. Ошибки их определения вызывают ошибки в напряжениях конденсаторов и увеличивают ошибки определения токов на следующем шаге расчета. В связи с этим применяется также другой способ разделения подсхемы с АИН, ТВП и нагрузкой на взаимосвязанные подсхемы. Он заключается во введении в рассматриваемую подсхему трехфазной системы виртуальных регулируемых источников напряжения в соответствии с рис. 9.

АИН

(AB)

Для разделения схемы на рисунке на более простые взаимосвязанные подсхемы к зажимам трехфазной обмотки ТВП подключена трехфазная система виртуальных источников напряжения u_{vn} (n = 1, 2, 3). В виртуальных источниках в фазах используются П-регуляторы токов Rin. На входы регуляторов поступают сигналы по мгновенным значениям токов фаз виртуальных источников i_{vn} , на выходах формируются мгновенные значения напряжений u_{vn} . Заданные токи фаз виртуальных источников равны 0. При больших коэффициентах усиления регуляторов обеспечивается незначительность фактических токов, т. е. отсутствие вли-

яния виртуальных источников на электромагнитные процессы.

u_{sn}

Вместе с тем наличие в подсхеме на рис. 9 трехфазной системы виртуальных источников напряжения позволяет осуществить следующее преобразование подсхемы. На каждом шаге расчета по времени в каждой фазе виртуальный источник напряжения переносится во все ветви схемы, которые соединены в общем узле. При этом образуется семейство подсхем, представленных на рис. 10. Взаимные связи полученных подсхем учитываются зависимыми источниками напряжения и тока.

Взаимные связи подсхем рис. 10 учитываются с помощью виртуальных источников напряжения u_{vn} и зависимых источников тока i_{vn} (n = 1, 2, 3)

$$\frac{di_{vn}}{dt} = \frac{di_{n2}}{dt} - \frac{di_{C_3n}}{dt} - \frac{di_{sn}}{dt},$$

$$i_{vn} = i_{n2} - i_{C_3n} - i_{sn}.$$
(5)

Напряжения на емкостях трехфазного фильтра

$$u_{C_3n} = \frac{1}{C_3} \int i_{C_3n} dt, \quad n = 1, 2, 3.$$
 (6)



Напряжения виртуальных источников

$$u_{vn} = -K_i i_{vn}, \quad n = 1, 2, 3,$$
 (7)

где *K_i* – коэффициент усиления П-регулятора.

Производные токов фаз нагрузки

$$\frac{di_{sn}}{dt} = \frac{1}{L_3 + L_s} (u_{vn} - e_{sn}), \quad n = 1, 2, 3.$$
(8)

Производные токов в фазах емкостного фильтра определяются из выражения

$$\frac{di_{C_3n}}{dt} = \frac{1}{L_{C_3} + L_{\rm st}} \left(u_{\nu n} - u_{C_3n} - R_{C_3} i_{C_3n} + L_{\rm st} \frac{di_{C_3n}}{dt} \right),$$
(9)

где L_{st} – стабилизирующая индуктивность, с помощью которой обеспечивается устойчивость итерационного процесса вычислений (см. алгоритм вычислительного процесса [6] далее).

Модели АИН. При моделировании электрических установок по методологии расчета систем по взаимосвязанным подсистемам используется математическое описание АИН, представленное во многих публикациях [6]–[9]. В соответствии с этим описанием воздействие АИН на ТВП представляется многофазной системой зависимых источников напряжения u_{n1} , а воздействие ТВП на АИН учитывается многофазной системой токов фаз i_{n1} , где n – номер фазы; N – количество фаз. Связи подсхемы АИН с другими подсхемами осуществляется при включении системы уравнений АИН в общую систему при расчетах по алгоритму, представленному далее.

Математическое описание многофазно-трехфазного ТВП. При разделении комплексов с ППН на взаимосвязанные подсистемы ТВП выделяется как устройство, обмотки которого замкнуты на зависимые трехфазные или многофазные источники напряжения. Это позволяет выполнить математическое описание ТВП как самостоятельного устройства. Подсхемы ТВП, использованные для моделирования, представлены на рис. 11. ТВП имеет на статоре *N*-фазную обмотку. Фазы соединены в звезду, их количество произвольно (3, 5, 7...). На роторе размещена 3-фазная обмотка. Ротор неподвижен. Ось 1-й фазы ротора (продольная ось *d*) смещена относительно оси 1-й фазы статора на угол т. Статор имеет напряжения фаз u_{n1} и токи i_{n1} (n = 1, 2, ..., N), ротор имеет напряжения фаз u_{n2} и токи i_{n2} (n = 1, 2, 3). Описание ТВП построено на базе описания многофазных машин с заторможенным ротором [6].

Обмотка статора описывается в координатах фаз. В ней учитываются активные сопротивления R_1 и индуктивности рассеяния L_{s1} (индуктивности рассеяния фаз одинаковы для всех последовательностей токов). Взаимосвязь статорной подсхемы с другими контурами учитывается зависимыми источниками напряжения e_{n1} . Для обеспечения устойчивости вычислительного процесса индуктивности фаз увеличиваются на значение стабилизирующей индуктивности L_{st} и соответственно изменяются ЭДС фаз. Изменение ЭДС фаз осуществляется для компенсации изменения индуктивностей. Обмотка ротора описывается также в координатах фаз. В ней учитываются активные сопротивления R₂ и индуктивности рассеяния L_{s2}. Связи подсхемы ротора с другими контурами учитываются зависимыми источниками напряжения en2. Для обеспечения устойчивости вычислительного процесса индуктивности фаз увеличиваются на значение стабилизирующей индуктивности L_{st} и соответственно изменяются ЭДС фаз. Напряжения фаз создаются внешними устройствами и определяются их математическим описанием.

Контуры намагничивания описаны в осях d и qи в них учтены индуктивности намагничивания L_m и активные сопротивления R_m . Связи этих контуров с другими подсхемами учтены зависимыми источниками тока i_{ad} и i_{aq} . При переходах от осей фаз к осям dq и обратных переходах используются преобразования переменных к осям α и β . На рис. 11 указаны направления осей и угол поворота τ оси d ротора относительно оси α (угол τ фиксирован).

Описания переменных статора и ротора выполнены с учетом коэффициентов приведения по числам витков и обмоточным данным k_w и по соотношению чисел фаз обмоток (число фаз ротора M = 3)

$$k_n = N/M, \quad k_{pr} = k_n k_w. \tag{10}$$

В модели ТВП используются коэффициенты

$$c_n = \cos\left[\frac{2\pi}{N}(n-1)\right], \ s_n = \sin\left[\frac{2\pi}{N}(n-1)\right]; \ (11)$$

уравнения подсхемы обмотки статора:

$$\frac{di_{n1}}{dt} = \frac{1}{L_{s1} + L_{st}} \left(u_{n1} - e_{n1} - R_1 i_{n1} + L_{st} \frac{di_{n1}}{dt} \right); (12)$$

производные токов статора по осям α и β:

$$\frac{di_{\alpha}}{dt} = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^{N} c_n \frac{di_{n1}}{dt}, \quad \frac{di_{\beta}}{dt} = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^{N} s_n \frac{di_{n1}}{dt}; \quad (13)$$

производные токов статора по осям d, q:

$$\frac{di_{d1}}{dt} = \frac{di_{\alpha}}{dt} \cos \tau + \frac{di_{\beta}}{dt} \sin \tau, \qquad (14)$$

$$\frac{di_{q1}}{dt} = \frac{di_{\alpha}}{dt} \sin \tau - \frac{di_{\beta}}{dt} \cos \tau;$$

уравнения подсхемы обмотки ротора:

$$\frac{di_{n2}}{dt} = \frac{1}{L_{s2} + L_{st}} \times \left(u_{n2} - e_{n2} - R_2 i_{n2} + L_{st} \frac{di_{n2}}{dt} \right); \quad (15)$$

производные токов ротора по осям d, q:

$$\frac{di_{d2}}{dt} = k_w \frac{di_{12}}{dt},$$

$$\frac{di_{q2}}{dt} = k_w \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{di_{32}}{dt} - \frac{di_{22}}{dt} \right);$$
(16)

производные токов намагничивания по осям d, q:

$$\frac{di_{ad}}{dt} = \frac{di_{d1}}{dt} + \frac{di_{d2}}{dt}, \quad \frac{di_{aq}}{dt} = \frac{di_{q1}}{dt} + \frac{di_{q2}}{dt}.$$
 (17)

Проекции напряжений зависимых источников обмотки ротора на оси *d* и *q* определяются как падения напряжения на ветвях намагничивания:

$$e_{d2} = L_m \frac{di_{ad}}{dt}, \quad e_{q2} = L_m \frac{di_{aq}}{dt}; \quad (18)$$

проекции напряжений зависимых источников обмотки статора на оси *d*, *q*

$$e_{d1} = e_{d2} + R_m i_{ad}$$
, $e_{q1} = e_{q2} + R_m i_{aq}$; (19)

проекции ЭДС обмотки статора на оси α и β:

$$e_{\alpha} = e_{d1}\cos\tau + e_{q1}\sin\tau,$$

$$e_{\beta} = e_{d1}\sin\tau - e_{q1}\cos\tau;$$
(20)

ЭДС зависимых источников в фазах статора:

$$e_{n1} = e_{\alpha}c_n + e_{\beta}s_n; \qquad (21)$$

ЭДС зависимых источников в фазах ротора:

$$e_{12} = k_{pr}e_{d2},$$

$$e_{22} = k_{pr}\left(-e_{d2}/2 - e_{q2}\sqrt{3}/2\right),$$

$$e_{32} = k_{pr}\left(-e_{d2}/2 + e_{q2}\sqrt{3}/2\right);$$
(22)

токи статора по осям α и β

$$i_{\alpha} = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^{N} c_n i_{n1}, \ i_{\beta} = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^{N} s_n i_{n1};$$
 (23)

преобразование токов обмотки статора к осям dq:

$$i_{d1} = i_{\alpha} \cos \tau + i_{\beta} \sin \tau,$$

$$i_{q1} = i_{\alpha} \sin \tau - i_{\beta} \cos \tau;$$
(24)

проекции токов фаз ротора на оси d и q:

$$i_{d2} = i_{12}, \quad i_{q2} = (i_{32} - i_{22})/\sqrt{3};$$
 (25)

токи намагничивания по осям d и q:

$$i_{ad} = i_{d1} + i_{d2}, \quad i_{aq} = i_{q1} + i_{q2}.$$
 (26)

В модели ТВП учитывается насыщение стали.

Особенности управления ППН. В системе управления ППН (см. рис. 5) ШИП снабжен двухконтурной системой регулирования. Внешний ПИрегулятор поддерживает напряжение на входе АИН и формирует заданные токи в ветвях ШИП. В каждой ветви индивидуальный регулятор поддерживает ток, формируя напряжение управления.

Регулятор АИН также двухконтурный. Во внешнем контуре ПИ-регулятор поддерживает заданное напряжение ППН (380 В, 50 Гц) и формирует заданную амплитуду токов фаз. Подчиненный регулятор тока формирует амплитуду

напряжений управления АИН *u*у*m*. При известной частоте ω вычисляются мгновенные значения напряжений управления фаз.

При наличии в ППН нескольких групп емкостей (C_1 , C_2 , C_3), связанных индуктивностями, и при указанном управлении процессы в системе склонны к колебаниям. В модели системы использован алгоритм стабилизации процессов, основанный на определении коэффициента пульсаций напряжения конденсатора C_2 и в корректировке частоты напряжений управления в соответствии с выражениями

$$u_{g,t+\Delta t} = u_{g,t} + \left(u_{C2} - u_{g,t}\right)\Delta t/T_u;$$

$$\omega_f = \left[1 + K_f \left(u_{C2}/u_{g,t+\Delta t} - 1\right)\right]\omega,$$
(27)

где $u_{g,t+\Delta t}$ – отфильтрованное напряжение; Δt – время цикла системы управления; T_u – постоянная времени; K_f – коэффициент пульсаций; ω – частота напряжения ППН; ω_f – откорректированная частота напряжения.

Для повышения использования оборудования в напряжения управления вводятся составляющие нулевой последовательности в соответствии с выражениями (для 5-фазного АИН)

$$\tau_n = \omega_f t - 2\pi (n-1)/N,$$

$$u_{yn} = U_{ym} \left[\sin(\tau_n) - 0.07 \sin(N\tau_n) \right],$$
(28)

где τ_n – фазы напряжений; *n* – номера фаз.

Форма пилообразного опорного напряжения и 5-фазной системы напряжений управления АИН в соответствии с (28) в номинальном режиме работы ППН представлена на рис. 12.



Комплекс моделей ППН. Комплекс моделей систем с ППН, источниками питания и нагрузками построен в среде моделирования собственной разработки ComSim [6]. Программы расчета выполнены на языке C++. Для каждого типа ППН разработана индивидуальная модель, в которую включены описания подсхем и их взаимных связей. Во всех моделях расчеты выполняются по общему алгоритму (рис. 13).

Особенность моделей, построенных по методологии расчета систем по взаимосвязанным подсистемам, заключается обычно в сравнительно

.....

малых затратах машинного времени при расчетах на ЭВМ [7]. В данном случае это преимущество проявляется в меньшей степени, однако позволяет обеспечить приемлемые затраты времени при значительном количестве итераций и малых шагах интегрирования.



Расчеты электромагнитных процессов в системах с ППН. Расчеты электромагнитных процессов в ППН выполнены при следующих данных: напряжение источника питания равно 220 В; емкость $C_2 = 5 \text{ м}\Phi$; индуктивность рассеяния дросселя в ветви ШИП – 0.5 мГн; взаимные индуктивности полуобмоток уравнительных дросселей - 5 мГн; частота опорных напряжений ШИП и АИН -4 кГц; напряжение на выходе ШИП (на входе АИН) составляет 1000 В; активная мощность ТВП – 700 кВт; коэффициент мощности – 0.7; количество фаз со стороны АИН – 5 (статор), со стороны нагрузки – 3 (ротор); напряжение обмотки ротора – 380 В; частота – 50 Гц; коэффициент приведения обмотки ротора к обмотке статора – 0.5 (повышающий по напряжению). Индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора - 0.081 и 0.084 o. e.; индуктивность намагничивания 10.7 о. е.; заданная активная мощность нагрузки -600 кВт, коэффициент мощности – 0.9. Основные результаты расчетов электромагнитных процессов в системе в номинальном режиме работы представлены на рис. 14 (напряжения и токи ППН в режиме работы, близком к номинальному) и в таблице.

Выполненные расчеты свидетельствуют, что модели ППН достаточно точно отражают физические процессы в системах и позволяют определить нагрузки всех основных элементов для проектирования. При этом виртуальные источники напряжения практически не повлияли на результаты расчетов.



Puc.	14
------	----

Характеристика	Значение	Фаза,°
Напряжение источника, В	218.808	_
Ток источника, А	2743.12	_
Напряжение конденсатора C ₂ , В	1000.09	-
Ток конденсатора C ₂ , А	466.773	-
Напряжение фазы АИН, В	426.987	
амплитуда, В	802.724	
действ. знач. на частоте 50 Гц, В	328.834	-148.184
коэф. искажения синусоидальности	0.6378	
Ток 1-й фазы АИН (статора ТВП), А	687.833	
действ. знач. на частоте 50 Гц, А	686.979	154.005
коэф. искажения синусоидальности	0.04983	
Ток 1-й фазы ротора ТВП, А	1016.480	
действ. знач. на частоте 50 Гц, А	1016.442	0.008618
коэф. искажения синусоидальности	170.686	
Напряжение 1-й фазы вирт. источников, В	226.410	
действ. знач. на частоте 50 Гц, В	223.773	-164.017
Ток конденсатора C ₃ , А	12.076	-
Напряжение 1-й фазы нагрузки, В	217.878	
действ. знач. на частоте 50 Гц, В	217.869	-164.197
коэф. искажения синусоидальности	0.009038	
Ток 1-й фазы нагрузки, А	1005.994	
действ. знач. на частоте 50 Гц, А	1005.994	-10.0402
коэф. искажения синусоидальности	0.000402	
Напряжение управления 1-й фазы АИН, о. е.	0.659	
амплитуда, о. е.	0.885	
действ. знач. на частоте 50 Гц, о. е.	0.657	-148.186
коэф. искажения синусоидальности	0.07347	
Активная мошность на выхоле ППН кВт	606 872	_

Из результатов можно отметить следующее.

Амплитуда напряжения управления АИН равна 0.885 о. е., что на 11.5 % меньше амплитуды пилообразного напряжения (1 о. е.). Это следует рассматривать как запас на регулирование.

Коэффициент искажения синусоидальности напряжений управления АИН 7.3 % соответствует доле составляющих нулевой последовательности (7 % для 5-фазного ТВП), введенных для повышения использования АИН.

Повышенная частота ШИМ и трехфазный *LC*фильтр на выходе ППН позволили обеспечить минимальный коэффициент искажения напряжений на выходе ППН (искажения менее 1 %).

Необходимо отметить сравнительно низкий коэффициент мощности ТВП со стороны статора,

равный 0.533 (этот параметр определяется из табл. по разности фаз напряжения и тока статора). Это результат влияния больших индуктивностей рассеяния обмоток и токов намагничивания ТВП.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

 Разработан комплекс моделей IGBT-преобразователей переменно-постоянного напряжения. Из состава этих моделей представлено подробное описание модели с 5-фазно-трехфазным трансформатором с вращающимся магнитным полем.

1. Kumar S., Singh B. A Frequency Observer Based Control for Solar Energy Conversion System // IECON-2017. Beijing, China. P. 2321–2325.

2. Frequency Participationby Using Virtual Inertiain Wind Turbines Including Energy Storage / X. Zhaoxia, H. Yu, J. M. Guerrero, F. Hongwei // IECON-2017. Beijing, China. P. 2492–2497.

3. Contoller Design and Fault Tolerance Analysis of 4-Phase Floating Interleaved Boost Converter for Fuel Cell Electric Vehicles / Q. Li, Y. Huangfu, J. Zhao, S. Zhuo, F. Chen // IECON-2017. Beijing, China. P. 7753–7758.

4. Comparison Study of Electric Vehicles Charging Stations with AC and DC Buses for Bidirectional Power Flow in Smart Car Parks / T. He, J. Zhu, D. D.-C. Lu, L. Zheng, M. M. Aghdam, J. Zhang // IECON-2017. Beijing, China. P. 4609–4614.

5. Hierarchical Controlofa Photovoltaic/Batterybased DC Microgrid Including Electric Vehicle Wireless Charging Station / X. Zhaoxia, F. Haodong, J. M. Guerrero, F. Hongwei // IECON-2017. Beijing, China. P. 2522–2527. 2. В системах с многофазными АИН и ТВП для повышения использования оборудования по напряжению целесообразно вводить в напряжения управления составляющие нулевой последовательности. Для 3-фазных АИН доля этих составляющих от основных гармоник 13 %, для 5-фазных систем – 7 %.

3. При построении преобразователей переменно-постоянного напряжения на базе АИН и ТВП следует учитывать, что ТВП имеет весьма низкий коэффициент мощности со стороны АИН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

6. Мамутов А. Р., Пронин М. В., Воронцов А. Г. Моделирование обратимого статического преобразователя переменно-постоянного напряжения // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 10. С. 55–59.

7. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Электро-механотронные комплексы и их моделирование по взаимосвязанным подсистемам. СПб.: Ладога, 2017. 220 с.

8. Разработка, моделирование и исследование транзисторного преобразователя для питания сети 400 В, 50 Гц / И. А. Пименова, А. С. Григорян, М. В. Пронин, А. Г. Воронцов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 5. С. 61–66.

9. Разработка, моделирование и исследование транзисторного преобразователя для питания сети постоянного напряжения / И. А. Пименова, В. В. Глушаков, М. В. Пронин, А. Г. Воронцов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 7. С. 60–66.

10. Кузьмин И. Ю., Черевко А. И., Лимонникова Е. В. Особенности проектирования трансформаторов с вращающимся магнитным полем для полупроводниковых преобразователей // Электричество. 2016. № 2. С. 39–44.

A. G. Vorontsov OJSC «Npcses»

M. V. Pronin, A. R. Mamutov PJSC «Power machines»

A. S. Grigoryan Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

MODELS OF AC-DC IGBT-CONVERTERS WITH 3-, 5- AND 7-PHASE-THREE-PHASE TRANSFORERS

Static AC-DC converters based on IGBT voltage source inverters (VSI), PWM DC-DC voltage converters and transformers were considered. Description of AC/DC-C model complex was given. Mathematical description of a multi-phase – three-phase rotating-field transformer (RFT), including a 5- or 7-phase primary winding and a 3-phase secondary winding, is presented. The AC/DC-C model with DC/DC-C-, VSI-, RFT- and LCL-filter is described based on the methodology of system calculation by interconnected subsystems. In modeling virtual controlled AC sources that allowed to separate the system on the interconnected subsystems and to simplify the mathematical description of the plant, to provide stability of calculation processes, are used. Calculation results of electromagnetic processes in AC/DC-C are presented that proved adequacy of modeling methods and developed models.

Semiconductor converter, voltage source converter, pulse-width modulation converter, 5-phase winding, modeling