

## УДК 621.314.263

И. А. Пименова, А. С. Григорян, М. В. Пронин, А. Г. Воронцов Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

# Разработка, моделирование и исследование транзисторного преобразователя для питания сети 400 В, 50 Гц

Предложена структура транзисторного ПЧ, определены параметры оборудования, разработаны алгоритмы управления в нормальных, переходных и аварийных режимах. Разработаны компьютерные модели ПЧ по методологии моделирования систем по взаимосвязанным подсистемам, а также в MatLab Simulink. Выполнено сравнение моделей по результатам вычислений и затратам машинного времени на расчеты. Структура ПЧ и предложенный алгоритм управления позволяют обеспечить соответствие выходных напряжений требованиям стандартов, ограничить токи ПЧ в аварийных режимах и за счет этого минимизировать габариты и стоимость оборудования.

## Преобразователь частоты, моделирование, система управления, качество электроэнергии, аварийный режим работы, затраты машинного времени

В электроэнергетических системах (ЭЭС) основными источниками энергии обычно служат турбины и синхронные генераторы. При увеличении мощности установок увеличиваются их масса и габариты. При этом в автономных ЭЭС (например, в транспортных) возникают проблемы с размещением оборудования. Одно из решений заключается в увеличении частоты вращения генераторов и первичных двигателей. Однако при этом возникает задача обеспечения потребителей электроэнергией со стандартными параметрами, например 400 В, 50 Гц. Задачи согласования параметров источников электроэнергии, электросетей и потребителей возникают в ветроустановках [1]–[3], в электростанциях с солнечными батареями [4], в гибридных электростанциях [5], в судовых системах [6], системах с аварийными источниками энергии [7]. Решаются такие задачи обычно при использовании электромашинных или полупроводниковых преобразователей (ПП).

Электромашинные агрегаты (ЭМА) выдерживают длительные перегрузки, многократные токи короткого замыкания (КЗ), позволяют организовать селективную защиту электросетей от КЗ путем ограниченных форсировок токов. ЭМА при работе обладают запасом кинетической энергии, с помощью которого обеспечивается питание нагрузок при кратковременных перерывах электроснабжения на входе, но они имеют низкий КПД, большую массу, повышенные вибрации. Стоимость их обслуживания выше. ПП имеют более высокий КПД, проще в обслуживании и ремонте. Современная элементная база обычно позволяет выполнить ПП с меньшими габаритами. Однако они выдерживают меньшие и менее длительные токи КЗ. Возникают проблемы электромагнитной совместимости оборудования. При указанных преимуществах и недостатках преобразователей различных типов существует тенденция замены электромашинных систем статическими.

К источникам электроэнергии в ряде случаев предъявляется требование по поддержанию, например, трехкратного тока короткого замыкания в течение заданного времени, что позволяет обеспечить селективную защиту оборудования автоматическими выключателями электросети. Это требование сравнительно легко реализуется в синхронных генераторах. В транзисторном ПП увеличение токов нагрузки приводит к увеличению габаритов и стоимости преобразователей. С учетом изложенного рассматривается преобразователь частоты (ПЧ) автономной ЭЭС для преобразования энергии трехфазного генератора 690 В, 200 Гц в электроэнергию электросети 400 В, 50 Гц. При этом поставлена задача ограничения токов короткого замыкания на выходе ПЧ средствами управления для обеспечения селективности работы коммутационных аппаратов электросети.

Схема рассматриваемой установки с трехфазным источником питания, транзисторным ПЧ и трехфазной электросетью с *RL*-нагрузкой представлена на рис. 1.



ПЧ содержит трансформатор Тр, диодный выпрямитель ДВ, фильтр с индуктивностью  $L_d$  и емкостью C, автономный инвертор напряжения АИН, фильтр выходного напряжения с емкостью  $C_{fs}$  активными сопротивлениями  $R_f$  и индуктивностями  $L_f$  и  $L_{lfs}$ , а также систему управления СУ. Трехфазный источник напряжения содержит ЭДС  $e_{sn}$ , индуктивности  $L_s$ , ПИ-регулятор действующего напряжения. Трехфазная нагрузка содержит активные сопротивления  $R_l$ , и индуктивностями  $L_l$ .

Одна из моделей установки с ПЧ разработана по методологии моделирования систем по взаимосвязанным подсистемам [8], в соответствии с которой установка разделяется на части, взаимосвязанные зависимыми источниками напряжения и тока. Каждая часть и их связи описываются алгебраическими и дифференциальными уравнениями. Полученные уравнения объединяются в едином алгоритме вычислений рис. 2. В этот алгоритм включаются также уравнения СУ.



В рассматриваемом случае первоначально СУ отделяется от силовой части и эти подсистемы связываются друг с другом сигналами датчиков и управляющих воздействий.

СУ трехфазного источника напряжения содержит блок расчета действующего линейного напряжения  $U_s$  и ПИ-регулятор напряжения (рис. 1).

В блоке расчета  $U_s$  выполняются следующие вычисления:

$$A = u_{s1}^{2} + u_{s2}^{2} + u_{s3}^{2},$$
  

$$B_{t+\Delta t} = B_{t} + (A - B_{t})\Delta t_{y}/T_{us},$$
  

$$U_{s} = \sqrt{B_{t+\Delta t}},$$
(1)

где  $u_{sn}$  – мгновенные напряжения фаз; A и  $B_t$  – промежуточные переменные;  $\Delta t$  – шаг работы СУ;  $T_{us}$  – постоянная времени апериодического фильтра.

На входы ПИ-регулятора напряжения сети поступают сигналы по фактическому  $U_s$  и заданному  $U_{sz}$  линейным напряжениям. На выходе регулятора формируется амплитуда фазных ЭДС сети  $E_s$ :

$$E_{s} = E_{si, t+\Delta t} + (U_{sz} - U_{s})K_{uo},$$
  
если  $E_{s} < E_{s, mx},$  то  
 $E_{si, t+\Delta t} = E_{si, t} + (U_{sz} - U_{s})\Delta t_{y}K_{io},$   
иначе  $E_{s} = E_{s, mx},$ 

где  $E_{s, mx}$  – предельная амплитуда ЭДС фаз;  $E_{si}$  – интегральная составляющая амплитуды ЭДС;  $K_{uo}$  и  $K_{io}$  – коэффициенты обратных связей по интегралу отклонения и по отклонению напряжения от заданного значения.

Напряжения фаз сети:

$$u_{sn} = e_{sn} - L_s \frac{di_{sn}}{dt} - R_s i_{sn}, \ n = 1, \ 2, \ 3.$$

Далее осуществляется преобразование силовой схемы. В частности, напряжения первичной обмотки Тр приводятся ко вторичной обмотке, а токи вторичной обмотки приводятся к первичной обмотке:

$$u_{sn} = \frac{u_{sn}}{K_{tr}}, \quad \frac{di_{tn}}{dt} = \frac{1}{K_{tr}} \frac{di_{tn}}{dt},$$
$$i_{tn} = \frac{1}{K_{tn}} i_{tn}, \quad n = 1, 2, 3,$$

где *K*<sub>tr</sub> – коэффициент трансформации Тр.

Другое преобразование схемы — замена конденсатора C зависимым источником напряжения  $u_t$ :

$$u_{c} = \frac{1}{C} \int i_{c} dt,$$
$$u_{t} = u_{c} + R_{t} i_{c}.$$

Источник  $u_t$  переносится в ветви схемы, которые сходятся в одном общем узле – в ветвь с индуктивностью  $L_d$  и в плечи транзисторного моста. Это преобразование схемы отражено на рис. 3.



Выпрямленные токи диодного и транзисторного мостов образуют зависимый источник тока  $i_c$ , воздействующий на фильтровой конденсатор в отдельной подсхеме, изображенной на рис. 3:

$$i_c = i_d - i_{di}.$$

Следующее преобразование расчетной схемы заключается в замене конденсаторных фильтров выходного напряжения  $R_f - C_f$  зависимыми источниками напряжения:

$$u_{fn} = \frac{1}{C_f} \int i_{fn} dt,$$
$$u_n = u_{fn} + R_f i_{fn}.$$

Полученные зависимые источники напряжения *u<sub>n</sub>* переносятся в ветви схемы, которые соединяются в общих узлах. При этом токи фаз АИН и нагрузки образуют зависимые источники тока:

$$i_{fn} = i_n - i_{ln}.$$

Воздействие токов  $i_{fn}$  на трехфазный фильтр  $R_{f}$ - $C_{f}$  осуществляется в отдельной подсхеме рис. 3.

Состояния транзисторов АИН определяются следующими условиями:

если транзистор открыт, то  $k_{vn} = 1$ , иначе  $k_{vn} = 0$ .

Преобразование транзисторной подсхемы рис. 3 осуществляется по следующим условиям:

если 
$$i_n > 0$$
, то  $S_{in} = 0$ ,  
иначе  $S_{in} = 1$ ,  
 $e_n = \left[ \left( 1 - B_l \right) k_{vn} + B_l S_{in} \right] u_l$ ,

где  $S_{in}$  – переменная, характеризующая направление тока фазы АИН,  $B_l$  – переменная, соответствующая наличию (1) или отсутствию (0) команды блокировки управляющих импульсов.

При этом подсхема с АИН рис. 4, *а* преобразуется к виду рис. 4, *б*.



Уравнение для определения производных токов фаз АИН и самих токов (рис. 4, *б*):

$$\frac{di_{vin}}{dt} = \frac{1}{L_f}(e_n - u_n).$$

После определения токов фаз вычисляются токи в плечах АИН положительного полюса:

$$i_{\nu n} = \left[ \left( 1 - B_l \right) k_{\nu n} + B_l S_{in} \right] i_{\nu in}.$$

Входной ток АИН:

$$i_{di} = \sum_{n=1}^{3} i_{\nu n} \, .$$

Уравнение для определения производных токов фаз нагрузки и самих токов (рис. 3):

$$\frac{di_{ln}}{dt} = \frac{1}{L_{lf} + L_l} \left( u_n - R_l i_{ln} \right).$$

Структурная схема системы управления АИН представлена на рис. 5.



СУ АИН включает в себя блок расчета напряжения на выходе АИН U, регуляторы, задатчик токов фаз АИН. В блок расчета U подаются напряжения фаз АИН  $u_n$  и определяется действующее напряжение U аналогично (1). Сигналы по U и заданному напряжению  $U_z$  подаются на



*Puc.* 6

входы ПИ-регулятора, на выходе которого формируется экстремум тока  $I_m$ . Заданные токи фаз формируются с использование заданной частоты и поступают на входы ПИ-регуляторов тока. На другие входы этих регуляторов поступают сигналы фактических токов фаз  $i_n$ . На выходах регуляторов токов формируются напряжения управления  $u_{yn}$ , которые поступают в блоки формирования импульсов управления.

Аналогичная модель создана в MatLab Simulink [9]. Основная структура модели отражена на рис. 6. В модели учтены трехфазный источник синусоидального напряжения (Voltage source), трансформатор (Transformer), ДВ (Universal bridge), сглаживающий *LC*-фильтр ( $L_d$ , *C*), АИН (IGBT Bridge), трехфазный *LCL*-фильтр ( $L_f$ ,  $C_f$ ,  $R_{cf}$ ,  $L_{lf}$ ) и активно-индуктивная нагрузка ( $R_l$ ,  $L_l$ ).

На рис. 7 представлена структура блока СУ, содержащего аналоговую и дискретную части.



Дискретная часть (ДЧ) СУ (рис. 8, *a*), формирует и дискретизирует напряжения управления.

ДЧ СУ включает в себя ПИ-регулятор напряжения и подчиненные ему ПИ-регуляторы токов фаз нагрузки. Эти регуляторы формируют напряжения управления фаз АИН. Чтобы учесть дис-

кретность работы СУ, производится дискретизация напряжений управления таким образом, чтобы на каждом периоде работы СУ напряжение управления было постоянно. Для повышения использования ПЧ по напряжению к напряжениям управления в каждой фазе добавляется третья гармоника с амплитудой 13 % от основной гармоники. Полученные напряжения управления используются аналоговой частью модели для формирования импульсов управления транзисторами. В аналоговой части (АЧ) СУ, представленной на рис. 8, б, формируются сигналы управления в результате сравнения напряжения управления и опорного напряжения при работе АИН в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). На рис. 9 представлены результаты расчета процессов в системе при КЗ в цепи нагрузки.

В этом режиме ток на выходе ПЧ увеличивается до заданного ограничения, например 120 %, и поддерживается на этом уровне в течение заданного времени, например 10 с. Если увеличение тока ПЧ обусловлено пуском мощного двигателя, то за указанное время пуск должен завершиться, ток должен уменьшиться и напряжение ПЧ должно восстановиться. Если увеличение тока обусловлено КЗ и выключатели электросети не отключили неисправный участок сети, то напряжение не восстанавливается и по истечении указанного времени ПЧ выключается. Рис. 9 подтверждает возможность практической реализации предложенного алгоритма управления ПЧ.





Рассмотрены также режимы работы системы при сбросе и набросе нагрузки. В частности, на рис. 10 представлен процесс наброса на ПЧ 100 % нагрузки.

Из рис. 10 видно, что при набросе 100 % нагрузки на источник провал выходного напряжения ПЧ составляет порядка 14 % и в течение нескольких периодов устраняется системой управления.

Адекватность разработанных моделей ПЧ подтверждается сравнением результатов расчетов. В таблице приведены некоторые результаты расчетов, полученные на моделях ПЧ разного типа.

| Параметры сравнения              | MatLab<br>Simulink | Visual<br>Studio |
|----------------------------------|--------------------|------------------|
| Выпрямленное напряжение, В       | 679.2              | 684.6            |
| Ток 1-й фазы нагрузки, А         | 534.7              | 541.1            |
| Напряжение 1-й фазы нагрузки, В  | 229.3              | 231.0            |
| Мощность нагрузки, кВт           | 292.8              | 300.0            |
| Напряжение управления АИН, о. е. | 0.699              | 0.710            |
| Время расчета, с                 | 130                | 10               |

Из таблицы видно, что модели разного типа рассматриваемого ПЧ позволяют получить практически одни и те же результаты расчетов. Однако модель, построенная по методологии расчета систем по частям работает в 13 раз быстрее, чем модель, построенная в MatLab Simulink.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Online estimation of the power coefficient versus tip-speed ratio curve of wind turbines / J. D. M. de Kooning, J. Van de Vyver, T. L. Vandoom // IECON-2013. Nov. 10–13. Vienna, Austria. Vienna, 2013. P. 1790–1795.

2. State-space averaging model of wind turbine with PMSG and its virtual inertia control / S. Qiaoming, W. Gang, F. Lijun et al. // IECON-2013. Nov. 10–13. Vienna, Austria. Vienna, 2013. P. 1878–1884.

3. Wang Z., Zhang B., Chu K. Design and experimentation of interleaved PWM and generalized control schemes for paralleled grid converters of wind energy



1. Предложена структура мощного источника напряжения для питания трехфазной электросети. Источник содержит транзисторный преобразователь частоты с *LCL*-фильтром на выходе и систему управления. Система управления имеет внешний контур регулирования выходного напряжения и внутренние контуры регулирования токов фаз. Отличительной особенностью источника является то, что при коротких замыканиях на выходе токи ограничиваются на заданном уровне, например 120 %, и этот режим поддерживается до спадания токов или при ограничении по времени в течение, например, 10 с.

2. Разработаны модели транзисторного ПЧ для питания сети 400 В, 50 Гц по методологии моделирования систем по взаимосвязанным подсистемам (в среде C++ Builder) и в MatLab Simulink.

3. Выполнено сравнение моделей разных типов по точности вычислений и затратам машинного времени на расчеты. Получено, что модель, построенная по методологии моделирования систем по взаимосвязанным подсистемам, работает в 13 раз быстрее.

4. На разработанных моделях транзисторного ПЧ выполнены расчеты и исследования установившихся, переходных и аварийных процессов, которые подтвердили работоспособность рассматриваемой силовой схемы и предложенного алгоритма управления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

systems // IECON-2013. Nov. 10–13. Vienna, Austria. Vienna, 2013. P. 1581–1586.

4. Rasin Z., Ahsanullah K., Rahman M. F. Design and simulation of quasi-Z-source gridconnected PV inverter with bidirectional power flow for battery storage management // IECON-2013. Nov. 10–13. Vienna, Austria. Vienna, 2013. P. 1587–1592.

5. Rezkallah M., Chandra A., Singh B. Three-leg fourwire voltage source inverters for hybrid standalone system feeding unbalanced load // IECON-2013. Nov. 10–13. Vienna, Austria. Vienna, 2013. P. 1914–1919. 6. Centralized Stabilizer for Marine DC Microgrid / M. K. Zadeh, B. Zahedi, M. Molinas, L. E. Norum // IECON-2013. Nov. 10-13. Vienna, Austria. Vienna, 2013. P. 3357–3361.

7. Мамутов А. Р., Пронин М. В., Воронцов А. Г. Моделирование обратимого статического многотактного преобразователя переменно-постоянного напряжения. / Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 10. С. 55–58.

8. Пронин М. В. Электромеханотронные системы. Создание на основе комплекса уточненных быстродействующих моделей. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. C. 224–240.

9. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2014. 288 с.

10. Active Damping Control for a Three Phase Grid-Connected Inverter using Sliding Mode Control / R. Guzman, I. G. de Vicuna, A. Camacho et al. // IECON-2013. Nov. 10–13. Vienna, Austria. Vienna, 2013. P. 380–385.

I. A. Pimenova, A. S. Grigorian, M. V. Pronin, A. G. Vorontsov Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

### DEVELOPMENT, MODELING AND TEST TRANSISTOR CONVERTER FOR POWER NETWORK 400 V, 200 Hz

Structure of transistor frequency converter is offered, parameters of equipment are identified, control algorithms are developed for normal and emergency mode. Computer models of frequency converter are developed by methodology of modeling systems of interconnected subsystems and also in MatLab Simulink. Models were compared by results of calculations and the expenses for computer calculations time. Structure of frequency converter and proposed control algorithm allow to provide conformity voltages requirements of standards, to limit currents im emergency mode, and at the expense of that to minimize dimensions and cost of equipment.

Frequency converter, modeling, control system, power quality, emergency mode, expense of machine time