



УДК 62-50

СИНТЕЗ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ МОСТОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ С МЯГКИМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ КОММУТАЦИИ ТРАНЗИСТОРОВ

С.А. Александрова^a, А.П. Баев^b, Н.А. Николаев^a, О.В. Слита^a^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация^b НИИ Точной Механики, Санкт-Петербург, 195256, Российская Федерация

Адрес для переписки: alexandrova_sophie@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 28.04.18, принята к печати 25.05.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-700-703

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Александрова С.А., Баев А.П., Николаев Н.А., Слита О.В. Синтез закона управления мостового преобразователя напряжения с мягким переключением на основе изменения частоты коммутации транзисторов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 4. С. 700–703. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-700-703

Аннотация

Предлагается метод широтно-импульсного регулирования мостовым преобразователем напряжения постоянного тока, напряжение питания которого меняется в широком диапазоне, основанный на изменении частоты коммутации транзисторов мостового инвертора, реализованный в виде пропорционально-интегрального регулятора с настраиваемыми параметрами. Разработанный метод позволяет улучшить динамические характеристики системы и ограничить максимальный ток, коммутируемый транзисторами. Спроектированный закон управления позволяет получить желаемое стабилизированное значение напряжения на нагрузке.

Ключевые слова

мостовой инвертор, мягкая коммутация, широтно-импульсное регулирование, пропорционально-интегральный регулятор, индуктивность рассеивания

Благодарности

Работа выполнена при государственной поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 08-08). Работа была поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (проект 14.Z50.31.0031).

CONTROL LAW DESIGN FOR FULL-BRIDGE CONVERTER WITH SOFT COMMUTATION BASED ON FREQUENCY VARIATION OF TRANSISTORS SWITCHING

S.A. Alexandrova^a, A.P. Baev^b, N.A. Nikolaev^a, O.V. Slita^a^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation^b JSC Research Institute of Fine Mechanics, Saint Petersburg, 195256, Russian Federation

Corresponding author: alexandrova_sophie@mail.ru

Article info

Received 28.04.18, accepted 25.05.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-700-703

Article in Russian

For citation: Alexandrova S.A., Baev A.P., Nikolaev N.A., Slita O.V. Control law design for full-bridge converter with soft commutation based on frequency variation of transistors switching. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 700–703 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-700-703

Abstract

A method of pulse-width control of the high power full-bridge converter with widely varied supply voltage is proposed. The method is based on the carrier frequency variation and is implemented as proportional-integral controller with adjustable parameters. The proposed method allows improving dynamic characteristics of the system and limiting of maximum current commuted by transistors. The proposed control law allows receiving desired load voltage.

Keywords

full-bridge inverter, soft commutation, pulse-width control, proportional-integral controller with adjustable parameters, transformer leakage inductance

Acknowledgements

This work was supported by the Government of the Russian Federation (grant 08-08) and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project 14.Z50.31.0031).

В работе рассматривается мостовой преобразователь напряжения постоянного тока, используемый в качестве вторичного источника питания [1, 2] при низком входном напряжении и требуемом высоком выходном напряжении и мощности, включающий в себя мостовой инвертор, повышающий трансформатор с добавочной индуктивностью, введенной в первичную обмотку для обеспечения мягкой коммутации силовых ключей и исключения насыщения сердечника [3], и диодный выпрямитель, нагруженный на емкостной фильтр и активную нагрузку. В литературе представлены способы повышения КПД путем изменения частоты коммутации для случая, когда нагрузка изменяется в диапазоне от 25% до 100% [4, 5]. Увеличение частоты коммутации позволяет уменьшить линейные размеры сердечника трансформатора при сохранении выходной мощности, что ведет к уменьшению магнитных потерь, но потери, обусловленные переключением силовых ключей, значительно увеличиваются [6].

Рассмотрим передаточную функцию заданного преобразователя «управляющий сигнал – напряжение выхода» [7]:

$$W(s) = \frac{U_{\text{вых}}(s)}{d(s)} = \frac{nU_{\text{пит}}}{s^2 L' C_f + s \frac{L'}{R_l} + 1}, \quad (1)$$

где $U_{\text{вых}}(s)$ – преобразование Лапласа напряжения выхода; $d(s)$ – преобразование Лапласа сигнала управления (коэффициент заполнения); $U_{\text{пит}}$ – напряжение питания; $1/n$ – коэффициент трансформации; C_f – емкость фильтра; R_l – сопротивление нагрузки; L' – эквивалентная суммарная индуктивность инвертора, равная сумме индуктивностей рассеивания трансформатора и добавочной, приведенная к вторичной обмотке трансформатора.

В [8] показано, что для исследуемого преобразователя наиболее оптимальная частота коммутации транзисторов $f_{\text{sw}0}$ для заданных условий функционирования составляет 7,25 кГц, и выведены из описания кривой тока в первичной обмотке трансформатора зависимости максимального тока, коммутируемого транзисторами, и среднего тока на выходе инвертора $I_{\text{ав}}$ от коэффициента ШИМ (широтно-импульсная модуляция) $K_{\text{ШИМ}}$ и f_{sw} :

$$I_{\text{max}} \approx \frac{U_{\text{пит}} K_{\text{ШИМ}} T_{\text{ШИМ}}}{L'}, \quad I_{\text{ав}} = \frac{I_{\text{max}} (L' / R_s + I_{\text{max}} L' / U_{\text{пит}})}{T_{\text{ШИМ}}}, \quad (2)$$

где R_s – эквивалентное суммарное сопротивление схемы замещения рассматриваемого преобразователя, $T_{\text{ШИМ}} = 1/(0,5 f_{\text{sw}})$ – период широтно-импульсного регулирования. Из (2) можно сделать вывод, что при фиксированных значениях I_{max} , L , R_s поддержание величины среднего тока на выходе инвертора при увеличении напряжения его питания достижимо только при увеличении частоты f_{sw} . С целью увеличения КПД предлагается не использовать максимально допустимую частоту коммутации транзисторов для всего диапазона изменения напряжения питания, определяемую для максимального напряжения питания, а настраивать ее значение согласно разработанному методу управления.

Для управления объектом (1) применим пропорционально-интегральный регулятор $W_{\text{pi}}(s) = k \left(1 + \frac{1}{T_s} \right)$, где s – комплексная переменная; k , T – параметры регулятора [9], значения которых изменяются в процессе функционирования в зависимости от напряжения питания преобразователя. Найдем параметры регулятора k_0 , T_0 для минимального значения напряжения питания $U_{\text{пит}0} = 175$ В и установленного минимального значения $f_{\text{sw}0} = 7,25$ кГц. Время переходного процесса должно быть не более 0,5 с, запас по фазе должен быть 80° . Тогда передаточная функция регулятора принимает вид $W_{\text{pi}0}(s) = 12 \cdot 10^{-4} \left(1 + \frac{1}{1,63 \cdot 10^{-5} s} \right)$. Замкнем систему с помощью обратной связи по напряжению. Графики переходных процессов замкнутой системы приведены на рис. 1.

При изменении входного напряжения f_{sw} будет изменяться, а параметры регулятора настраиваться по выражениям:

$$T = \frac{T_0 f_{\text{sw}0}}{f_{\text{sw}}}, \quad k = \frac{k_0 T U_{\text{пит}0}}{T_0 U_{\text{пит}}}. \quad (3)$$

При этом максимальный ток, коммутируемый транзисторами, не превысит предельно допустимого значения.

Приведем алгоритм синтеза управления, основанного на изменении частоты коммутации транзисторов f_{sw} и настройке параметров регулятора в зависимости от величины напряжения питания преобразователя.

1. Определить и зафиксировать предельно допустимые максимальные значения пикового тока, коммутируемого транзисторами, и частоты их коммутации из технического описания выбранных транзисторных модулей.
2. Рассчитать величину оптимальной частоты коммутации транзисторов согласно методу, изложенному в [8] для минимального значения напряжения питания.
3. Определить способ корректировки параметров выбранного регулятора – итерационный или табличный.
4. Определить начальные значения параметров регулятора при оптимальной частоте коммутации транзисторов и минимальном напряжении питания.
5. Построить регулятор с настраиваемыми параметрами, которые будут определяться по (3) путем контроля величины максимального значения коммутируемого тока по (2).

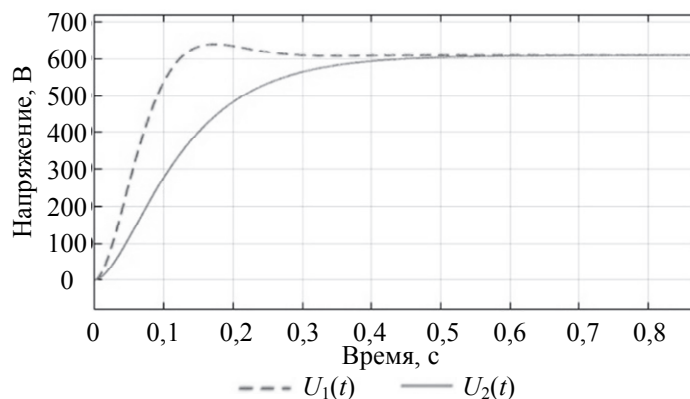


Рис. 1. Выход замкнутой системы для максимального значения напряжения питания $U_{пит} = 320$ В:
 $U_1(t)$ – переходной процесс с фиксированными параметрами регулятора k_0, T_0 и $f_{sw0} = 7,25$ кГц;
 $U_2(t)$ – переходной процесс с настраиваемыми параметрами регулятора k, T и $f_{sw} = 10$ кГц

Пример. На рис. 2, а, представлен опытный образец – мостовой повышающий преобразователь мощностью 100 кВт, входящий в состав частотного преобразователя. Также на рис. 2, б, в, приведены экспериментальные данные – кривые напряжения (инвертированного) U_i и тока I_i выхода мостового инвертора.

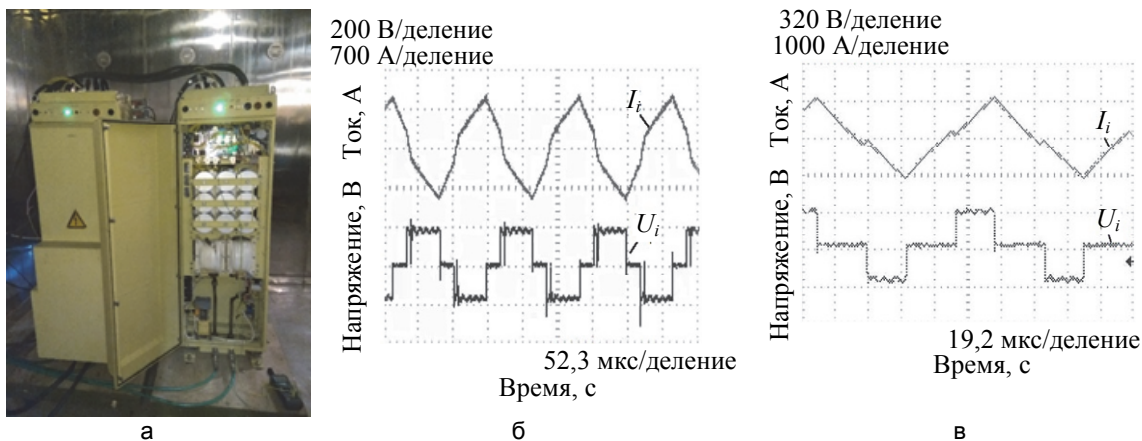


Рис. 2. Частотный преобразователь (а); экспериментальные результаты: при $U_{пит} = 187$ В, $K_{ШИМ} = 0,27$, $f_{sw} = 7,35$ кГц (б); при $K_{ШИМ} = 0,16$, $U_{пит} = 320$ В, $f_{sw} = 10$ кГц (в)

№	Напряжение питания, В	Амплитуда коммутируемого тока, А	$K_{ШИМ}$	f_{sw} , кГц
1	187	870	0,27	7,35
2	220	905	0,23	8
3	280	950	0,18	9
4	320	1000	0,16	10

Таблица. Экспериментальные результаты

Рис. 2 иллюстрирует, что силовые ключи функционируют в режиме мягкой коммутации, переключение при нулевых напряжениях. Результаты измерений приведены в таблице, которые демонстрируют ограничение пикового тока до заданного значения 1000 А.

Литература

1. Erickson R.W., Maksimovic D. *Fundamentals of Power Electronics*. 2nd ed. Springer, 2001. 885 p. doi: 10.1007/b100747
2. Мелешин В.И., Овчинников Д.А. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. М.: Техносфера, 2011. 576 с.
3. Александрова С.А., Баев А.П., Гончаренко М.Р., Николаев Н.А., Слита О.В. Метод подбора добавочной индуктивности мостового преобразователя напряжения с мягким переключением // Доклады ТУСУР. 2017. Т. 20. № 3. С. 220–225. doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-3-220-225
4. Zhao L., Li H., Liu Y., Li Z. High efficiency variable-frequency full-bridge converter with a load adaptive control method based on the loss model // *Energies*. 2015. V. 8. N 4. P. 2647–2673. doi: 10.3390/en8042647
5. Mallik A., Khalib A. Variable switching frequency state feedback control of a phase shifted full bridge DC/DC converter // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2016. V. 32. N 8. P. 6523–6531. doi: 10.1109/TPEL.2016.2616033
6. Chen Z., Liu S., Ji F. A power loss comparison of two full bridge converters with auxiliary networks // *Proc. 7th Int. Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC)*. Harbin, China, 2012. P. 1888–1893. doi: 10.1109/IPEMC.2012.6259126
7. Di Capua G., Shirsavar S.A., Hallworth M.A., Femia N. An enhanced model for small-signal analysis of the phase-shifted full-bridge converter // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2015. V. 30. N 3. P. 1567–1576. doi: 10.1109/TPEL.2014.2314241
8. Alexandrova S., Baev A., Goncharenko M., Nikolaev N., Slita O. Practical implementation of high power and efficiency DC-DC full-bridge PWM boost converter // *Proc. Int. Conf. on Information and Digital Technologies*. Zilina, Slovakia, 2017. P. 29–35. doi: 10.1109/DT.2017.8024268
9. O'Dwyer A. *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. 3rd ed. London: Imperial College Press, 2009. 608 p.

Авторы

Александрова Софья Александровна – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57195915997, ORCID ID: 0000-0001-9415-4294, alexandrova_sophie@mail.ru

Баев Андрей Петрович – кандидат технических наук, руководитель сектора, НИИ Точной Механики, Санкт-Петербург, 195256, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-5865-6104, baevap.niitm@gmail.com

Николаев Николай Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 13105019100, ORCID ID: 0000-0002-8835-5142, nikona@yandex.ru

Слита Ольга Валерьевна – кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 16242570700, ORCID ID: 0000-0001-7119-3629, o-slita@yandex.ru

References

1. Erickson R.W., Maksimovic D. *Fundamentals of Power Electronics*. 2nd ed. Springer, 2001, 885 p. doi: 10.1007/b100747
2. Meleshin V.I., Ovchinnikov D.A. *Control of Transistor Power Converters*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2011, 576 p. (in Russian)
3. Alexandrova S.A., Baev A.P., Goncharenko M.R., Nikolaev N.A., Slita O.V. Method to select the additional inductance value for full-bridge converter. *Proceedings of TUSUR*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 220–225. doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-3-220-225 (in Russian)
4. Zhao L., Li H., Liu Y., Li Z. High efficiency variable-frequency full-bridge converter with a load adaptive control method based on the loss model. *Energies*, 2015, vol. 8, no. 4, pp. 2647–2673. doi: 10.3390/en8042647
5. Mallik A., Khalib A. Variable switching frequency state feedback control of a phase shifted full bridge DC/DC converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, vol. 32, no. 8, pp. 6523–6531. doi: 10.1109/TPEL.2016.2616033
6. Chen Z., Liu S., Ji F. A power loss comparison of two full bridge converters with auxiliary networks. *Proc. 7th Int. Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC*. Harbin, China, 2012, pp. 1888–1893. doi: 10.1109/IPEMC.2012.6259126
7. Di Capua G., Shirsavar S.A., Hallworth M.A., Femia N. An enhanced model for small-signal analysis of the phase-shifted full-bridge converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, vol. 30, no. 3, pp. 1567–1576. doi: 10.1109/TPEL.2014.2314241
8. Alexandrova S., Baev A., Goncharenko M., Nikolaev N., Slita O. Practical implementation of high power and efficiency DC-DC full-bridge PWM boost converter. *Proc. Int. Conf. on Information and Digital Technologies*. Zilina, Slovakia, 2017, pp. 29–35. doi: 10.1109/DT.2017.8024268
9. O'Dwyer A. *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. 3rd ed. London, Imperial College Press, 2009, 608 p.

Authors

Sofia A. Alexandrova – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57195915997, ORCID ID: 0000-0001-9415-4294, alexandrova_sophie@mail.ru

Andrey P. Baev – PhD, Department Head, JSC Research Institute of Fine Mechanics, Saint Petersburg, 195256, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-5865-6104, baevap.niitm@gmail.com

Nikolay A. Nikolaev – PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 13105019100, ORCID ID: 0000-0002-8835-5142, nikona@yandex.ru

Olga V. Slita – PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 16242570700, ORCID ID: 0000-0001-7119-3629, o-slita@yandex.ru