ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 55, № 2, 2014, с. 52–59

http://journals.nstu.ru/vestnik
Scientific Bulletin of NSTU
Vol. 55, No. 2, 2014, pp. 52–59

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ

AUTOMATIC CONTROL AND REGULATION

УДК 621.341.572

Управление синхронной электрической машиной с возбуждением от постоянных магнитов в стартер-генераторной установке*

А.Н. РЕШЕТНИКОВ[1], С.А. ХАРИТОНОВ[2]

[1] 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, ассистент, e-mail: reshetnikov@ngs.ru
[2] 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, д. т. н., заведующий кафедрой, e-mail: Kharit1@yandex.ru

Стартер-генераторная установка для автономных систем позволяет объединить стартер и генератор в одну электрическую машину. В статье представлен автомобильный вариант стартер-генераторной установки. Рассмотрен алгоритм управления синхронной электрической машиной с возбуждением от постоянных магнитов в стартерном и генераторном режимах. В стартерном режиме синхронная электрическая машина работает в качестве двигателя и получает питание от суперконденсатора через инвертор напряжения. После запуска двигателя внутреннего сгорания инвертор напряжения переводится в режим активного выпрямителя, а электрическая машина переводится в режим генератора. Напряжение, генерируемое электрической машиной, необходимо стабилизировать на заданном уровне во всём диапазоне изменения нагрузки и частоты вращения вала. Выходное напряжение синхронной машины с возбуждением от постоянных магнитов прямо пропорционально скорости вращения ротора, на низких оборотах напряжение необходимо повысить, создавая подмагничивающую реакцию якоря, на высоких – понизить, создавая размагничивающую реакцию якоря. Стабилизация выходного напряжения установки осуществляется с помощью инвертора, который обеспечивает формирование отбираемого от синхронной электрической машины отстающего или опережающего по фазе тока. Реализация предложенной системы управления проверена на математической модели. Представлены результаты моделирования в стартерном и генераторном режимах.

Ключевые слова: стартер-генераторная установка, автономная система, синхронная машина с постоянными магнитами, подмагничивающая и размагничивающая реакция якоря, суперконденсатор, инвертор напряжения, активный выпрямитель, векторное управление

ВВЕДЕНИЕ

Совмещение функций стартера и генератора в одной электрической машине и её интеграция в единый энергетический блок с газотурбинными силовыми агрегатами или двигателями внутреннего сгорания (ДВС) позволяет значительно уменьшить массу и габариты автономных энергетических установок транспортных средств и систем генерирования возобновляемой энергетики [1].

В статье рассмотрена блок-схема автомобильной СГУ (рис. 1), где C – суперконденсатор [2], ИН – инвертор напряжения, СМПМ – синхронная машина с возбуждением от постоянных магнитов, U_{dc} – напряжение в звене постоянного тока.

СМПМ является бесконтактной, что значительно увеличивает надёжность и рабочий ресурс установки. Особенностью автомобильного применения такой СГУ является переменная частота вращения вала СМПМ, так как электрическая машина установлена на валу ДВС.

* *Статья получена 22 апреля 2014.*

В генераторном режиме в качестве нагрузки выступают не только потребители, но и бортовая сеть автомобиля с аккумуляторной батареей (АБ). Связь между бортовой сетью и промежуточным звеном повышенного напряжения U_{dc} осуществляется через *DC*/*DC*-преобразователь [3].

АБ имеет приемлемую энергоемкость (40 ÷ 300 Вт·ч/кг), но обладает ограниченным количеством зарядно-разрядных циклов (300 ÷ 3000). Кроме того, работа аккумулятора в режимах больших токов резко снижает его энергоемкость и срок эксплуатации. Суперконденсатор имеет низкую энергоемкость (1 ÷ 5 Вт·ч/кг), но весьма большой ресурс – до 10^6 циклов заряд-разряда. В то же время по сравнению с обычным электролитическим конденсатором суперконденсатор обладает запасённой удельной энергией на два порядка больше [4]. Суперконденсаторы можно применить как дополнительные источники электрической энергии для режимов работы, требующих быстрый заряд/разряд [5].

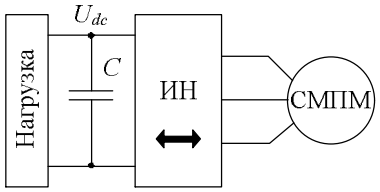


Рис. 1. Блок-схема СГУ

В рассматриваемой СГУ в стартерном режиме СМПМ работает в качестве двигателя и получает питание от суперконденсатора через ИН. Перед запуском напряжение на накопительном конденсаторе должно составлять U_{dc} = 110 В. Если напряжение ниже вышеупомянутого, то *C* заряжается от АБ через *DC*/*DC*-преобразователь. После заряда накопителя *DC*/*DC*-преобразователь отключается и начинается стартерный режим. При скорости n = 800 об/мин осуществляется запуск ДВС, ИН переводится в режим активного выпрямителя, а СМПМ – в режим генератора. Векторное управление позволяет сформировать на зажимах машины заданные внешние характеристики во всём диапазоне скоростей (n = 800 ÷ 8000 об/мин), поддерживать постоянное напряжение на суперконденсаторе *C*, обеспечивать его заряд. Через *DC*/*DC*-преобразователь осуществляется заряд АБ и питание бортовой нагрузки (P_H = 0 ÷ 4 кВт) [6].

Целью работы является повышение эффективности работы СГУ, для достижения которой решены следующие задачи: разработана математическая модель СГУ, рассмотрен алгоритм управления СМПМ в стартерном и генераторном режимах с точки зрения обеспечения заданных энергетических характеристик. В статье представлены результаты моделирования.

1. УПРАВЛЕНИЕ СМПМ

Векторный способ управления электрическими машинами переменного тока основан на преобразованиях координат, которые линеаризуют уравнения, описывающие электрическую машину [7]. Рассмотрим систему уравнений, описывающих СМПМ во вращающейся системе координат, связанной с ротором:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \dfrac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \dfrac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega\Phi \\ M = \dfrac{3}{2} p_{\text{п}} (\Phi i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \\ J \dfrac{d\omega_r}{dt} = M - M_{\text{с}} \\ P = -\dfrac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) \end{cases}, \qquad (1)$$

где u_d и u_q – проекции фазного напряжения статора на *dq*-оси, $U_m^2 = u_d^2 + u_q^2$,

U_m – амплитуда фазного напряжения якоря,

i_d и i_q – проекции тока статора на продольную и поперечную оси,

I_m – амплитуда фазного тока якоря,

R – активное сопротивление статорной обмотки,

L_d и L_q – индуктивности статора по dq-осям, в рассматриваемой СМПМ принято, что $L_d \approx L_q = L$,

ω – угловая частота вращения поля, $\omega = p_{\text{п}}\omega_r$,

$p_{\text{п}}$ – число пар полюсов,

ω_r – частота вращения ротора, $\omega_r = 2\pi n / 60$,

Ф – магнитный поток, создаваемый магнитами,

M – электромагнитный момент,

J – момент инерции,

M_c – момент сопротивления,

P – активная мощность генератора, равная мощности нагрузки P_H, при допущении что потери в инверторе равны нулю.

На рис. 2 представлены механические и электромеханические характеристики СМПМ в стартерном режиме. В данном случае показаны зависимости частоты вращения ротора от электромагнитного момента, который необходимо создать электрической машине, а также от действующего значения тока якоря (I_a), требуемого для создания данного момента.

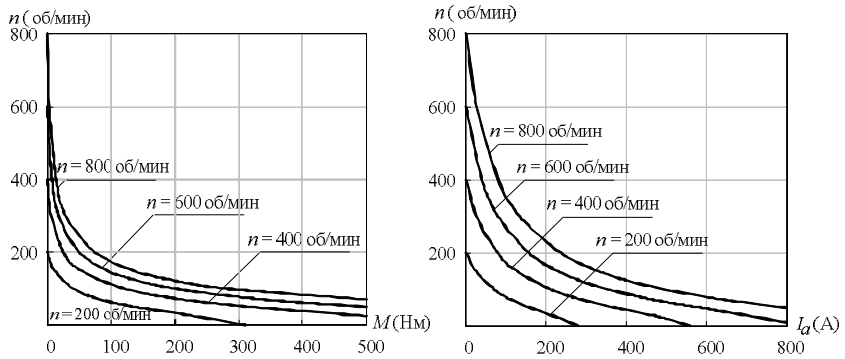


Рис. 2. Механические и электромеханические характеристики СМПМ

На рис. 3 и 4 представлены внешние характеристики СМПМ, т. е. зависимости действующего значения напряжения якоря (U_a) от тока якоря, а также энергетические характеристики СМПМ, т. е. зависимости активной мощности (P), полной мощности (S), коэффициента полезного действия (η), электрической машины в генераторном режиме, при n = 800 об/мин и n = 6000 об/мин соответственно, и cos ϕ = 0,8.

Регулирование выходного напряжения СМПМ возможно изменением реактивной составляющей тока статора (емкостной или индуктивной). На низкой частоте вращения ротора необходимо увеличить выходное напряжение электрической машины (рис. 3) с помощью намагничивающей реакции якоря, на высокой частоте – понизить (рис. 4) за счёт размагничивающей реакции якоря.

Для определения сигналов управления используется диакоптика – метод исследования сложных систем по частям [8, 9]. В течение каждой дискреты времени моделирования сигналы остаются неизменными, следовательно предполагается, что система статична, производные сигналов на отдельных интервалах равны нулю. Из первых двух уравнений системы (1) определены токи i_d и i_q, которые будут сигналами управления для токов в стартерном режиме:

$$\begin{cases} i_{d\,n} = -\dfrac{X_n E_n}{Z_n^2} \\ i_{q\,n} = \dfrac{\sqrt{(U_{mn} Z_n)^2 - (i_{d\,n} Z_n^2 + X_n E_n)^2} - R E_n}{Z_n^2}, \end{cases} \tag{2}$$

где $E_n = \omega_n \Phi$, $X_n = \omega_n L$, $Z_n^2 = R^2 + X_n^2$, индекс сигналов n – номер шага.

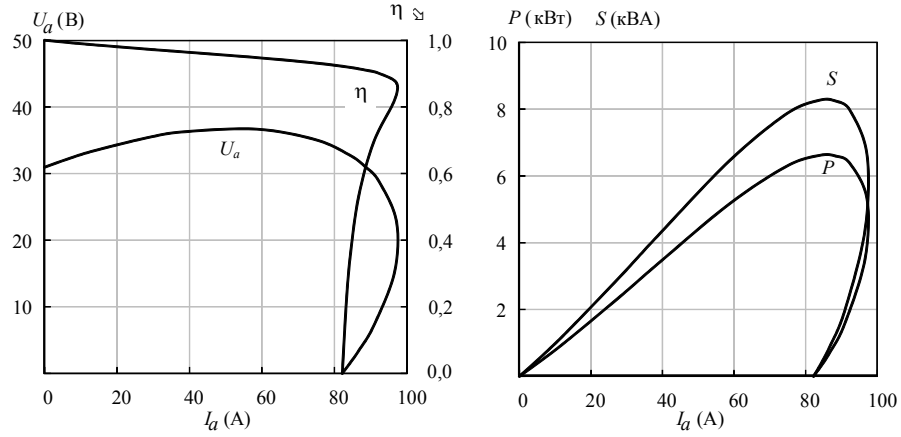


Рис. 3. Внешние и энергетические характеристики СМПМ при n = 800 об/мин

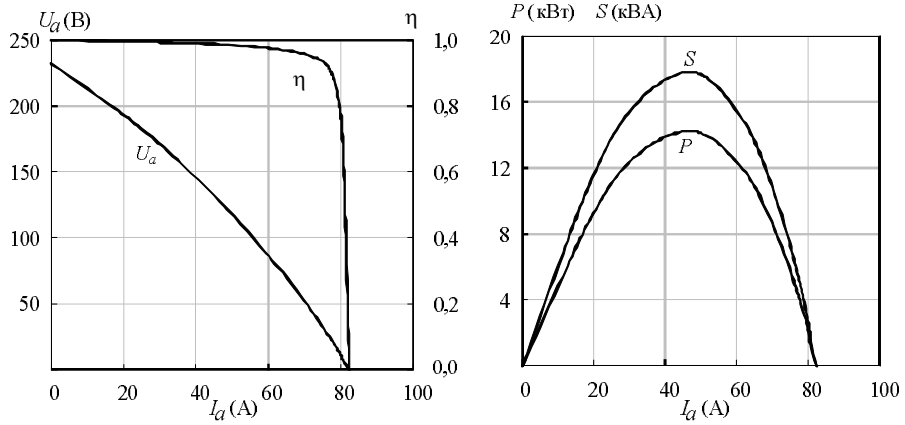


Рис. 4. Внешние и энергетические характеристики СМПМ при n = 6000 об/мин

При допущении, что в генераторном режиме реактивное сопротивление обмоток статора много больше, чем активное, из системы (1) определены продольная и поперечная составляющие тока якоря, которые будут сигналами задания для системы управления в генераторном режиме:

$$\begin{cases} i_{d\,n} = \dfrac{\sqrt{U_{m\,n}^2 - (X_n i_{q\,n})^2} - E_n}{X_n} \\ i_{q\,n} = -\dfrac{2P_n}{3E_n}. \end{cases} \tag{3}$$

Из системы (1) определена максимальную мощность, генерируемая СМПМ, с учётом активного сопротивления обмоток [10], при условии постоянства напряжения на выходных зажимах:

$$P_{\max n} = \frac{3}{2}\frac{U_{m\,n}(E_n Z_n - R U_{m\,n})}{Z_n^2}. \tag{4}$$

Схема управления СМПМ в режиме стартера и генератора представлена на рис. 5.

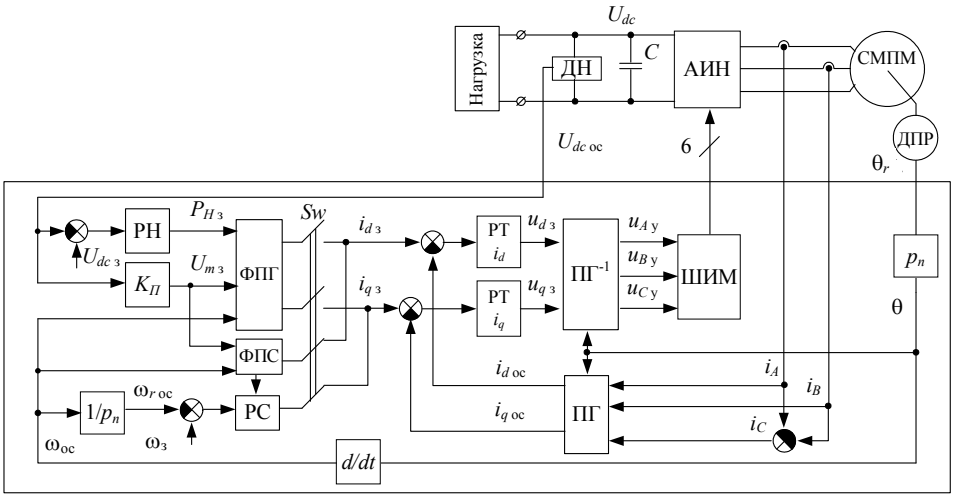


Рис. 5. Схема управления СГУ

Обозначения в схеме:
РН – регулятор напряжения с ограничением мощности (4);
$K_П = U_m / U_{dc}$ – коэффициент передачи преобразователя по напряжению;
ФПС – функциональный преобразователь стартерного режима (2);
ФПГ – функциональный преобразователь генераторного режима (3);
РС – регулятор скорости;
d/*dt* – производная по времени;
РТ – регулятор тока;
ДН – датчик напряжения;
ШИМ – широтно-импульсная модуляция;
ПГ – прямой преобразователь Парка – Горева из *ABC* в *dq*;
$ПГ^{-1}$ – обратный преобразователь Парка – Горева из *dq* в *ABC*;
ДПР – датчик положения ротора;
θ_r – геометрический угол поворота ротора;
p_n – число пар полюсов;
$\theta = \omega t$ – электрический угол поворота ротора относительно статора, $\theta = p_n\theta_r$;
индексы сигналов: з – задание, ос – обратная связь, у – управление.

Переключение из одного режима в другой происходит с помощью виртуального ключа *Sw*. В стартерном режиме ключ находится в верхнем положении, при достижении скорости машины $n = 800$ об/мин ключ меняет своё положение на нижнее – система работает в генераторном режиме.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Математическое моделирование осуществлялось в программной среде «Matlab-Simulink». Инвертор в модели представлен управляемыми источниками синусоидального напряжения. Такое представление вполне оправдано, если ИН будет реализован как IGBT-инвертор с широтно-импульсной модуляцией. В качестве СМПМ используется стандартная модель из библиотеки «Matlab-Simulink» с математическим описанием (1). Стабилизация напряжения в генераторном режиме обеспечивается намагничивающей реакцией якоря в диапазоне скоростей от 800 об/мин до 1100 об/мин и размагничивающей реакцией якоря в диапазоне скоростей от 1100 об/мин до 8000 об/мин.

Результаты моделирования СГУ в стартерном генераторном режимах показаны на рис. 6. Моделировалась система с начальным напряжением $U_{dc} = 110$ В в стартерном режиме. В режиме генератора начальное значение мощности нагрузки составляло $P_1 = 1$ кВт, затем

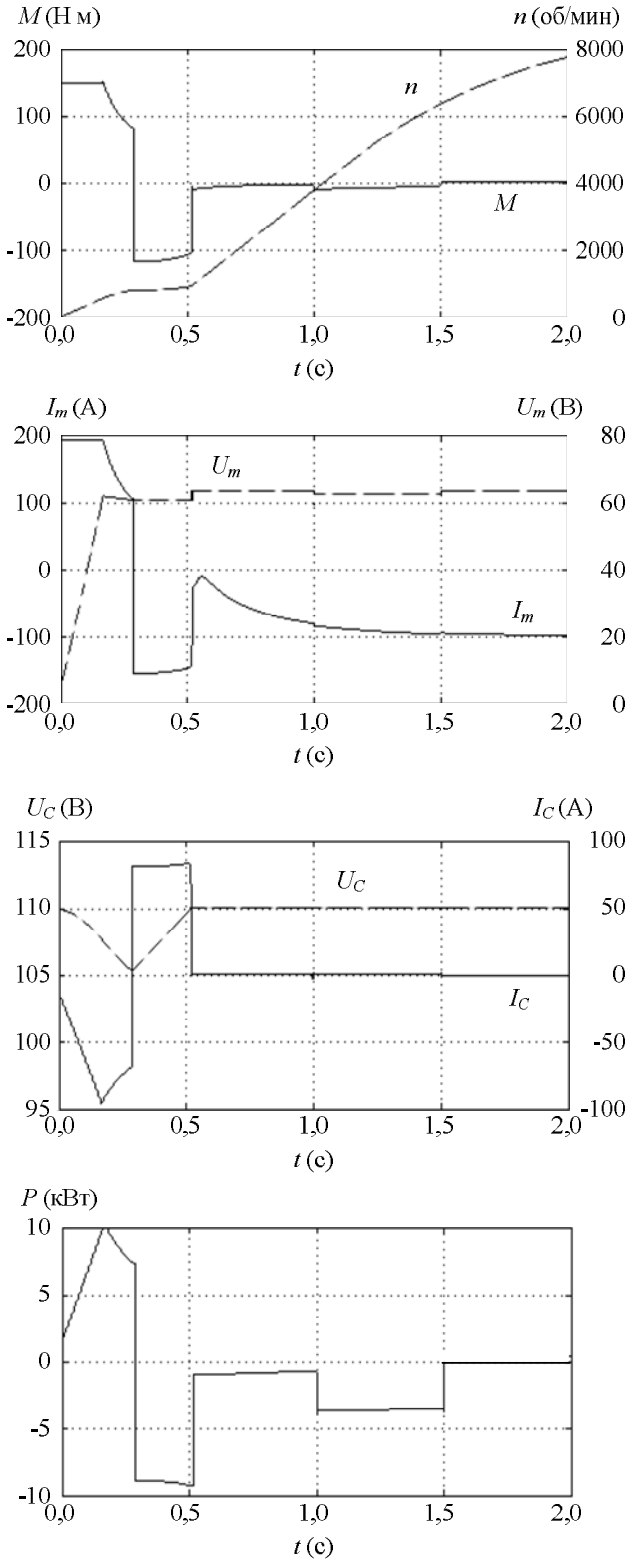


Рис. 6. Результаты моделирования СГУ

нагрузка увеличилась до $P_2 = 4$ кВт и снизилась до холостого хода $P_3 = 0$ в моменты времени $t_2 = 1$ с и $t_3 = 1{,}5$ с соответственно. Выходное напряжение СМПМ (U_m) в генераторном режиме, следовательно и напряжение в звене постоянного тока (U_{dc}), остается на заданном уровне во всём диапазоне скоростей и нагрузок.

Для создания максимального электромагнитного момента и минимизации тока статора в стартерном режиме необходимо поддерживать продольную составляющую тока, равной нулю. Но возможны ситуации, когда начальное напряжение суперконденсатора (U_C) меньше, чем $U_{dc} = 110$ В, и разряжена АБ. Следовательно, для реализации стартерного режима необходимо вводить продольную составляющую тока статора. С помощью математической модели СГУ выявлено, что запуск СМПМ до заданной скорости с $i_d = 0$ возможен при начальном напряжении на накопителе 96 В $\le U_{dc} \le$ 110 В. При напряжении 62 В $\le U_{dc} <$ 96 В в ФПС необходимо вычислять продольную составляющую тока по первому выражению системы (2). Максимальное значение тока якоря СМПМ ограничено величиной $I_m = 200$ А, чтобы предотвратить насыщение зубцовой зоны и создать максимальное значение пускового момента 150 Н м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты подтверждают работоспособность предложенного алгоритма управления электрической машиной в стартерном и генераторном режимах. Функциональность алгоритма проверена на математической модели во всём диапазоне скоростей и нагрузок, включая режим холостого хода.

В стартерном режиме эффективность работы СГУ повышается за счёт минимизации продольной составляющей тока в зависимости от начального напряжения на суперконденсаторе. В генераторном режиме системой управления определяется максимально возможная мощность СМПМ в зависимости от частоты вращения ротора и выходного напряжения, с учётом намагничивающей и размагничивающей реакции якоря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Emadi A., Williamson S.S., Khaligh A.** Power electronics intensive solutions for advanced electric, hybrid electric, and fuel cell vehicular power systems // IEEE Trans. on Power Electronics. – 2006. – Vol. 21, № 3. – P. 567–577.

[2] **Lai J.-S., Levy S., Rose M.F.** High energy density double-layer capacitors for energy storage applications // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 1992. – Vol. 7, № 4. – P. 14–19.

[3] **Holt D.** 42V Update // Service Tech. Magazine. – 2001, sept. – P. 14–16.

[4] **Чудновец С.П.**, **Харитонов С.А.** Накопители электрической энергии для систем генерирования электрической энергии: (аналит. обзор) // Науч. вестн. НГТУ. – 2013. – № 1. – С. 163–172.

[5] **Baisden A.C., Emadi A.** Advisor-based model of a battery and an ultra-capacitor energy source for hybrid electric vehicles // IEEE Trans. on Vehicular Technology. – 2004. – Vol. 53, № 1. – P. 199–205.

[6] **Shield D.** The impacts of advanced control systems on automotive storage technology // Product and technology development manager diacs. – 2001, May.

[7] **Шрейнер Р.Т.** Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

[8] **Крон Г.** Исследование сложных систем по частям – диакоптика: пер. с англ. – М.: Наука, 1972. – 544 с.

[9] **Хэпп Х.** Диакоптика и электрические цепи: пер. с англ. – М.: Мир, 1974. – 344 с.

[10] **Преображенский Е.Б., Решетников А.Н.** Исследование на математической модели работы стартер-генераторной установки в генераторном режиме // Материалы 8 международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». АПЭП–2006, Новосибирск, 26–28 сент. 2006 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – Т. 1. – С. 117–119.

Решетников Александр Николаевич, ассистент кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета. Направление научных исследований – силовая электроника, стартер-генераторные системы для автономных объектов. Имеет 22 публикации. E-mail: reshetnikov@ngs.ru

Харитонов Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – силовая электроника, теория преобразования электрической энергии, системы генерирования электрической энергии для автономных объектов. Количество опубликованных работ – более 300. E-mail: Kharit1@yandex.ru

Control of the permanent magnet synchronous machine with an integrated starter-generator set[*]

A.N. RESHETNIKOV[1], *S.A. KHARITONOV*[2]

[1] *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, assistant, e-mail: reshetnikov@ngs.ru*
[2] *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D.Sc. (Eng.), head of department, e-mail: Kharit1@yandex.ru*

An integrated starter-generator set for off-line systems allows combining the starter and the generator into one unit. A vehicle-type block diagram of the starter-generator is presented in this paper. Permanent magnet synchronous machine control in the starter and generator modes is proposed. The electric machine is fed by a supercapacitor via a voltage source inverter and operates as an engine in the starter mode. As soon as an internal combustion engine starts operating, the inverter begins to operate as an active rectifier, and the electric machine as a generator. It is necessary to stabilize the voltage generated by the electric machine at the required level at all ranges of load and shaft speeds. An output voltage of the permanent magnet synchronous machine is proportional to the rotor speed. It is necessary to increase voltage by armature magnetizing reaction at low speeds, and decrease voltage by armature demagnetizing reaction at high speeds. Output voltage stabilization is implemented by a voltage source inverter which provides an electric machine leading or lagging armature current. The realization of the proposed control circuit has been verified on a mathematical model. The results of modeling in the starter and generator modes are given in this paper.

Keywords: integrated starter-generator, off-line system, permanent magnet synchronous machine, magnetizing and demagnetizing armature reaction, supercapacitor, voltage source inverter, active rectifier, vector control

REFERENCES

[1] Emadi A., Williamson S.S., Khaligh A. Power electronics intensive solutions for advanced electric, hybrid electric, and fuel cell vehicular power systems. IEEE Trans. on Power Electronics, 2006, vol. 21, no. 3, pp. 567-577.

[2] Lai J.-S., Levy S., Rose M.F. High energy density double-layer capacitors for energy storage applications. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1992, vol. 7, no. 4, pp. 14-19.

[3] Holt D. 42 V Update. Service Tech. Magazine, September 2001, pp. 14-16.

[4] Chudnovets S.P., Kharitonov S.A. Nakopiteli jelektricheskoj jenergii dlja sistem generirovanija jelektricheskoj jenergii (analiticheskij obzor) [The analytical survey of energy storage devices for power generation systems]. *Nauchnyj vestnik NGTU* [Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University], 2013, no. 1. pp. 163-172.

[5] Baisden A.C., Emadi A. Advisor-based model of a battery and an ultra-capacitor energy source for hybrid electric vehicles. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2004, vol. 53, no. 1, pp. 199-205.

[6] Shield D. The impacts of advanced control systems on automotive storage technology. Product and technology development manager diacs. May 2001.

[7] Shrejner R.T. *Matematicheskoe modelirovanie jelektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovateljami chastoty*. Ekaterinburg, URO RAN Publ., 2000. 654 p.

[8] Kron G. *Diakoptics: the piecewise solution of large-scale systems.* London, MacDonald Publ., 1963. 166 p. (Russ. ed.: Kron G. *Issledovanie slozhnykh sistem po chastiam – diakoptika.* Moscow, Nauka Publ., 1972. 544 p.).

[9] Happ H.H. *Diakoptics and networks*. New York, Academic press, 1971. 314 p. (Russ. ed.: Khepp Kh. *Diakoptika i elektricheskie tsepi*. Moscow, Mir Publ., 1974. 344 p.)

[10] Preobrazhensky E.B., Reshetnikov A.N. Issledovanie na matematicheskoi modeli raboty starter-generatornoi ustanovki v generatornom rezhime [The research of the integrated starter – generator operation at a mathematical model in a generating mode]. *Materialy 8 mezhdunarodnoi konferentsii «Aktual'nye problemy elektronnogo priborostroeniia». APEP-2006.* [8 International conference on actual problems of electronic instrument engineering: proceeding. APEIE-2006]. Novosibirsk, 2006, vol. 1, pp. 117-119.

[*] *Manuscript received April 22, 2014.*