

УДК 62-83:621.313.32

Анищенко Н. В., канд. техн. наук
Канунников Р. В.,
Яровой Г.И.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННОЙ МАШИНОЙ В РЕЖИМЕ СТАРТЕРА

***Аннотация.** Применение тягового синхронного генератора в режиме стартера позволяет значительно упростить механическую часть дизель-генератора. Однако для управления синхронной машиной в этом режиме необходимо реализовать дополнительные законы регулирования. Исходя из особенностей энергообеспечения автономных транспортных средств (тепловоз) предложен выбор аппаратной части системы. Рассмотрена структура векторной системы управления синхронной машиной в режиме стартера. Выбор управляющих координат аргументирован, исходя из требований к системам запуска дизелей.*

***Ключевые слова:** Синхронная машина, автономный инвертор напряжения, накопитель, векторное управление, регулирование токов, режим стартера.*

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СИНХРОННОЮ МАШИНОЮ В РЕЖИМІ СТАРТЕРА

***Анотація.** Застосування тягового синхронного генератора в режимі стартера дозволяє значно спростити механічну частину дизель-генератора. Однак для управління синхронною машиною в цьому режимі необхідно реалізувати додаткові закони регулювання. Виходячи з особливостей енергозабезпечення автономних транспортних засобів (тепловоз) запропонований вибір апаратної частини системи. Розглянуто структуру векторної системи управління синхронною машиною в режимі стартера. Вибір керуючих координат аргументований, виходячи з вимог до систем запуску дизелів.*

***Ключові слова:** Синхронна машина, автономний інвертор напруги, накопичувач, векторне управління, регулювання струмів, режим стартера.*

CONTROL OF SYNCHRONOUS MACHINE IN STARTER MODE

***Abstract.** The use of the traction synchronous generator in the starter can so simplify the mechanical part of the diesel generator. However, for proper control the synchronous machine in this mode, need to implement additional control laws. Based on the features of the power supply of autonomous vehicles (diesel) offered a choice of hardware systems. The structure of the vector control system of synchronous machine in the starter mode. Selecting the control coordinates to argue on the basis of the requirements to run diesel systems.*

***Keywords:** Synchronous machine, voltage source inverter, vector control, current regulation, the starter mode.*

Введение. Синхронный явнополюсный генератор с электромагнитным возбуждением широко используется на тепловозах в качестве источника электрической энергии для питания тяговых электродвигателей. С учетом принципа обратимости электрических машин синхронный генератор может быть использован в режиме двигателя для пуска дизеля (стартера). Такое решение было предложено в [1,2].

Постановка проблемы. В последнее время, большое количество публикаций посвящено вопросу проектирования и организации систем управления для интегрированных (совмещенных) стартер-генераторов (ISG) на базе реактивных (SRM) или синхронных машин (СМ) с постоянными магнитами (PMSM) [3]. Вопросы управления такими машинами при использовании в качестве тяговых на подвижном транспорте и в составе общепромышленных

электроприводов достаточно подробно рассмотрены в литературе [4-9]. Хотя синхронная машина с электромагнитным возбуждением обладает рядом преимуществ, по сравнению с SRM и PMSM для тяговых задач, вопросам управления такой машиной в режиме стартера посвящено крайне мало публикаций [10].

Целью данной работы является выбор и построение структуры системы управления с учетом особенностей работы синхронной тяговой машины в режиме стартера.

Математическое описание электромагнитных процессов в СМ без демпферной обмотки удобнее представить в виде системы уравнений модели двигателя во вращающейся двухфазной системе координат dq . Уравнения напряжений статора:

$$U_d = R_s \cdot I_d + \frac{d}{dt} \psi_d - \omega \cdot \psi_q \quad (1)$$

$$U_q = R_s \cdot I_q + \frac{d}{dt} \psi_q + \omega \cdot \psi_d \quad (2)$$

где U_d, U_q, I_d, I_q – напряжения и токи обмотки статора по осям dq , R_s – активное сопротивление статора.

Соответствующие потокоцепления:

$$\psi_d = L_d \cdot I_d + L_m \cdot I_f \quad (3)$$

$$\psi_q = L_q \cdot I_q \quad (4)$$

где L_q, L_d – индуктивные сопротивления по поперечной и продольной оси; L_m – взаимная индуктивность между продольной осью статора и ротора;

Уравнение цепи обмотки возбуждения:

$$U_f = R_f \cdot I_f + \frac{d}{dt} \psi_f \quad (5)$$

где U_f, I_f – напряжение и ток обмотки ротора;

R_f – активное сопротивление обмотки возбуждения.

$$\psi_f = L_m \cdot I_d + L_f \cdot I_f \quad (6)$$

На основании уравнений (1)-(6) может быть получена схема замещения СМ, представленная на рис.1.

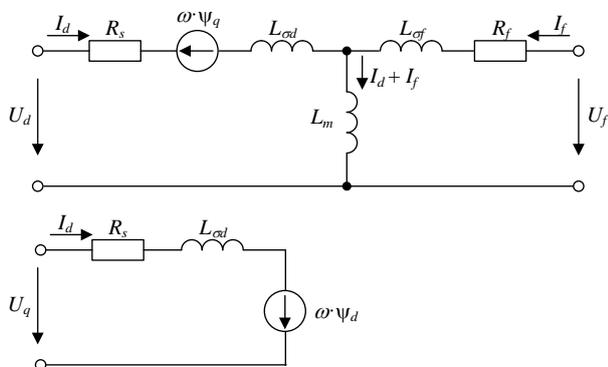


Рисунок 1

Электромагнитный момент СМ:

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [L_m \cdot I_f \cdot I_q + (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q] \quad (7)$$

Согласно (7) электромагнитный момент СМ состоит из двух составляющих – основного момента и реактивного, а также зависит от комбинации трех токов I_d, I_f, I_q .

Для осуществления успешного запуска дизеля необходимо создать на его валу

момент, зависящий от скорости прокручивания рис.2, поэтому основной задающей координатой целесообразно принять задание момента (тока) в функции от скорости. На рис.2 также приведена расчетная зависимость мощности на валу СМ в режиме стартера, для дизеля мощностью 6000 л.с.

При синтезе системы регулирования, следует учесть основное отличие от ISG: номинальный режим работы (основные параметры приведены в табл.1) и стартерный на порядок отличаются по энергетическим показателям. Поэтому переход в режим насыщения не стоит так остро, следовательно, помимо основной составляющей момента может быть реализована и реактивная $(L_d - L_q) > 0$ составляющая момента при положительных значениях тока I_d .

Регулировать токи I_d, I_f, I_q , необходимо так, чтобы при реализации заданного момента вращения, максимально эффективно использовать энергию накопителя [11].

Существуют различные подходы к выбору соотношения между токами I_d, I_f, I_q и их алгоритмическая реализация [8-10].

Табл. 1 – Параметры СМ

Параметр	Ном. значения
Мощность, кВт	4500
Линейное напряжение, В	1450
Фазный ток, А	1900
Частота вращения, мин ⁻¹	1000
Частота тока, Гц	100
Ток возбуждения, А	185
Полное индуктивное сопротивление по продольной оси, Ом	0,727
Полное индуктивное сопротивление по поперечной оси, Ом	0,456
Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, Ом	0,061
Постоянная времени обмотки возбуждения Td,c	1,4
КПД, %	95,5

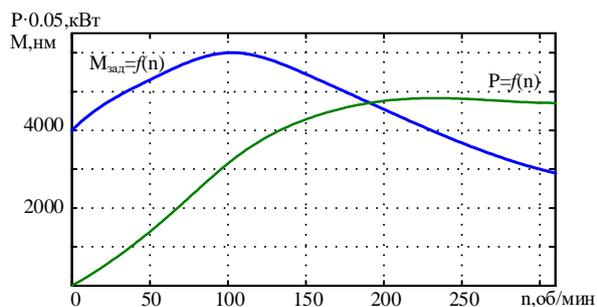


Рисунок 2 Расчетные зависимости реализуемого момента и мощности на валу СМ в режиме запуска дизеля

Из выражения (5) следует, что изменение тока I_d в переходных процессах оказывает влияние на процессы в обмотке возбуждения. Это свойство можно использовать для улучшения динамических характеристик контура возбуждения, т.к. постоянная времени обмотки возбуждения достаточно большая (в данном случае более секунды), а для форсировки возбуждения уровня напряжения может оказаться недостаточно. Поэтому во входную цепь инвертора введен накопитель энергии (СК) с повышающим зарядным устройством.

Структурная схема системы управления СМ в режиме стартера приведена на рис.3. В ходе экспериментальных исследований на натурном стенде были получены основные зависимости, уточнены настройки параметров регуляторов и функциональных преобразований.

Кратко поясним работу структурной схемы. От аккумуляторной батареи АБ получает питание повышающий преобразователь, который заряжает накопитель энергии СК до необходимого уровня. Инвертор напряжения реализует заданный ему вектор напряжения. Задание вектора напряжение поступает с выходов регуляторов активной P_{I_q} , и реактивной P_{I_d} , составляющих токов с компенсацией перекрестных связей формируемых в БКПС. На вход регуляторов токов поступают разности сигналов задания и обратной связи. Сигналы задания токов формируются на основании сигнала задания момента $M_{зад}$ и угла $\theta_{зад}$ определяющего соотношение активного и реактивного токов, с учетом

ограничения по максимальному значению тока статора. Функциональный преобразователь задания момента ФПМ формирует сигнал $M_{зад}$ в функции от скорости. Функциональный преобразователь возбуждения ФПВ формирует сигнал задания тока возбуждения, который сравниваясь с сигналом обратной связи поступает на регулятор P_{I_f} . Сигнал обратной связи по начальному и по текущему угловому положению ротора поступает от соответствующего датчика или вычисляется косвенным способом.

Также, при синтезе системы управления для режима стартера, следует обратить особое внимание на следующий факт. Несмотря на то, что синхронные тяговые генераторы, как правило, выполняются без демферных обмоток на роторе, они могут быть конструктивно выполнены с массивными полюсами. Такое исполнение ротора допустимо для номинального режима работы СМ – генератором. В переходных режимах, а стартерный режим работы, по большому счету полностью таковым и является, в массивных полюсах будут возникать вихревые токи, оказывая влияние на поведение СМ. В этом случае необходимо дополнить математическое описание СМ эквивалентными (мнимыми) контурами короткозамкнутой обмотки.

А сам, вопрос применения синхронных тяговых машин с электромагнитным возбуждением и массивными полюсами для режима стартера требует более детального изучения. При питании от инвертора в таких машинах будут возникать дополнительные потери, что необходимо учитывать при энергетических расчетах инвертора и накопителя энергии.

Выводы. Приведено математическое описание СМ при работе в режиме стартера. Проведен выбор моментозадающих координат и их регулирование. Описаны особенности работы СМ от инвертора напряжения в стартерном режиме. Предложена структура векторного управления СМ.

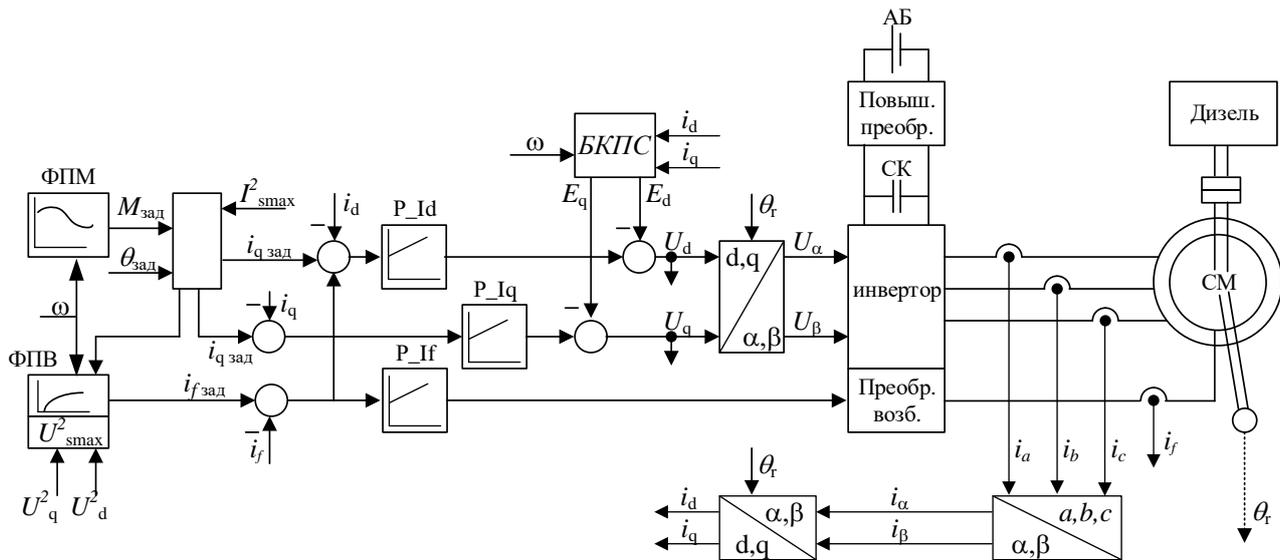


Рисунок 3 Структура векторной системы управления СМ в режиме стартера.

Список использованной литературы

1. Яровой Г.И. Система инверторного запуска тепловозного дизеля тяговым синхронным генератором / Г.И. Яровой, Р.В. Канунников и др. // Вестник Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля.– Луганск: изд-во ВНУ им. В. Даля., – 2012. – № 5(176). – ч. 1. – с. 161-163.
2. Иванов В.А. Современные решения ГП завод «Электротяжмаш» в области тяговых электропередач тепловозов и дизель-поездов / В.А. Иванов, С.М. Лемешко // Локомотив-информ. – 2013. – № 8. – С. 17 – 21.
3. Lequesne V., (2015) Automotive Electrification: The Nonhybrid Story, in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, no. 1, pp. 40-53, June 2015. doi: 10.1109/TTE.2015.2426573
4. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
5. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та інші. Електромеханічні системи автоматичного керування та

электроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та інші. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.

6. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.

7. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока [Текст] / А. В. Виноградов // Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – Иваново, 2008.– 298 с.

8. Schröder, Dierk. Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen / Dierk Schröder. – Berlin; Heidelberg : Springer, 2015. – 1879 p.

9. Novotny, D. W. Vector Control and Dynamics of AC Drives / D. W. Novotny and T. A. Lipo. – Oxford : Oxford University Press, 1996. – 440 p.

10. Ryvkin, Sergey Sliding Mode Control for Synchronous Electric Drives / Sergey Ryvkin, Eduardo Palomar Lever – Boca Raton : CRC Press, 2012. – 189 p.

11. Анищенко Н. В. Экспериментальное определение оптимальных пусковых параметров системы инверторного запуска дизель-генератора / Н. В. Анищенко, И. О. Тукалов, Г. И. Яровой, Р. В. Канунников // *Электротехн. и компьют. системы*. - 2014. - № 15. - С. 212-214

References

1. Yarovoi G.I. Sistema invertornogo zapuska teplovoznogo dizelya tyagovym sinkhronnym generatorom [System of locomotive diesel engine cranking by inverter fed traction alternator] (2012) *Journal of East Ukrainian National University named after Vladimir Dal.* – Lugansk: Lugansk: Izd EUNU. Vladimir Dal. – № 5(176). – ch. 1. – p. 161-163 (In Russian).

2. Ivanov V.A. Sovremennye reshenija GP zavod “Jelektrotjazhmash” v oblasti jelektroperedach teplovozov i dizel'-poezdov [Modern Solutions SE plant “Electrotyazhmash” in electric transmission of diesel locomotives and DMUs], (2013), */Lokomotiv-inform Publ.*, Kharkov, Ukraine, Vol. 8, pp. 17 – 21 (In Russian).

3. Lequesne B., (2015) Automotive Electrification: The Nonhybrid Story, in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, no. 1, pp. 40-53, June 2015. doi: 10.1109/TTE.2015.2426573

4. Slezhanovskii O.V. Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektroprivodov peremennogo toka s ventil'nymi preobrazovatelayami [Subordinate regulation systems of AC Drives With Static Converters], (1983), Moscow, Russian Federation, *Energoatomizdat*, 256 p. (In Russian).

5. Popovych M.G., Lozyns'kyj O. Ju., Klepikov V.B. Elektromehanichni systemy avtomatychnogo keruvannja ta elektroprivody [Electromechanical systems of automation control and electric drive], (2005) Kiev. Lybid', 680 p. (In Ukrainian).

6. Anuchin A.C. Sistemy upravleniya elektroprivodov: uchebnik dlya vuzov [Control systems of Electric Drive: Tutorial for High School], (2015), Moscow, MEI, 2015. – 373. p., (In Russian).

7. Vinogradov A. B. Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka [Vector control Of AC Drives] (2008) Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin. – Ivanovo, 298 p., (In Russian).

8. Schröder, Dierk. Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen Dierk Schröder. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2015. – 1879 p.

9. Novotny, D. W. Vector Control and Dynamics of AC Drives Oxford : Oxford University Press, 1996. – 440 p.

10. Ryvkin, Sergey Sliding Mode Control for Synchronous Electric Drives Boca Raton : CRC Press, 2012. – 189 p. doi: 10.1109/ECCE.2010.5618122

11. Anishenko N., Tupalov I., Iarovyi G., Kanunnikov R., Experimental determination of optimal start parameters of inverter startup system of the diesel-generator, *Electrotechnic and Computer Systems (ETKS)*, ISSN 2221-3937, vol. 15 (91), pp. 212-214, Oct. 2014 (in Russian)



Анищенко Николай Васильевич, к.т.н, каф. Автоматизированные электромеханические системы, Национальный Технический университет “ХПИ”



Канунников Роман Васильевич, ст. научный сотрудник научно-исследовательского и проектно-конструкторского отдела тяговых электрических передач, ГП завод “Электротязмаш”



Яровой Геннадий Иванович, заведующий научно-исследовательским и проектно-конструкторским отделом тяговых электрических передач, ГП завод “Электротязмаш”