

Н. В. АНИЩЕНКО, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;

Р. В. КАНУННИКОВ, ст. научн. сотр., ГП «Завод «Электротяжмаш», Харьков.

КОСВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ В ЗОНЕ МАЛЫХ СКОРОСТЕЙ

Введение. Синхронный явнополюсный генератор с электромагнитным возбуждением (СМ) 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. Использование СМ в режиме двигателя (стартера) для пуска дизеля предложено в системе инверторного запуска дизель-агрегатов тепловозов [1].

При проектировании систем управления электроприводом на базе СМ необходимо решать задачу по точному определению скорости и углового положения ротора такой машины. Для этих целей, как правило, применяются механические датчики угловых перемещений – энкодер, вращающийся трансформатор. Оснащение системы управления таким датчиком обладает рядом недостатков [2]. Значительный интерес вызывает реализация систем управления синхронными электроприводами без использования механических датчиков угловых перемещений («бездатчиковое управление»). Информация о скорости и текущем угловом положении ротора в этом случае определяется косвенно, на основании измерений электрических величин (токов, напряжений), использования наблюдателей и алгебраических вычислителей [1].

Постановка задачи. В современной литературе имеется большое количество публикаций по бездатчиковому управлению синхронными двигателями с постоянными магнитами (СДПМ), синхронными реактивными двигателями (СРД) и асинхронными двигателями (АД), в которых решаются задачи по определению начального углового положения ротора и обеспечения стабильной работы привода в зоне низких и высоких скоростей [2]. В отличие от выше перечисленных машин СМ с электромагнитным возбуждением можно рассматривать как трехмерный объект – дополнительным входом является напряжение возбуждения. Из-за конструктивных особенностей СМ, не многие из известных методов бездатчикового управления позволяют получить информацию о текущем угловом положении ротора, особенно при работе СМ в зоне низких скоростей.

В [10] предложено решение по определению начального углового положения ротора СМ. В данной статье авторами представлен следующий этап – этап управления СМ с электромагнитным возбуждением в зоне малых скоростей. Предлагается рассмотреть особенности косвенного определения углового положения ротора синхронной машины при работе в зоне малых скоростей, до 10% от номинальной.

Материалы и результаты исследования. Способы бездатчикового управления для СДПМ разделяют на два основных, принципиально разных подхода. В первом случае положение ротора может быть определено исходя из измерения противо-ЭДС, наводимой в статорной обмотке во время вращения двигателя. Такой способ имеет низкую эффективность в области низких скоростей вращения. В этом случае измерение наводимой противо-ЭДС вращения двигателя крайне затруднено, т.к. ЭДС сравнима по уровню с напряжением прикладываемым к статорной обмотке. Во втором случае определение углового положения ротора СДПМ при нулевой и очень низкой скорости, достигается посредством введения «тестирующего» сигнала (сигнала инжекции) тока или напряжения в статорную обмотку и оценки отклика на тестирующий сигнал с использованием разности продольной и поперечной индуктивностей СДПМ [3-5]. Т.к. частота «тестирующего» сигнала, как правило, значительно выше основной гармоники тока (напряжения), такой способ называют высокочастотной инжекцией.

В отличие от СДПМ, благодаря наличию обмотки возбуждения в СМ с электромагнитным возбуждением возможности косвенного определения углового положения ротора СМ могут быть расширены. Такая конструктивная особенность открывает возможность при реализации «бездатчикового» управления использовать не только обмотку статора, но и обмотку возбуждения для ввода тестового сигнала и анализа реакции в статоре [6-7].

Исходя из свойств преобразования электрической энергии алгоритмы, использующие дополнительные «тестирующие» сигналы для косвенного определения углового положения ротора СМ, в зависимости от расположения обмотки введения тестирующего сигнала – «источник» и обмотки измерения электрических величин, в которой происходит оценка отклика – «приемник», могут быть реализованы следующим образом (табл. 1).

Таблица 1 – Варианты пространственного расположения источника/приемника «тестирующего» сигнала.	
Расположение обмотки введения тестирующего сигнала	Расположение обмотки оценки отклика
Статор	Статор
Ротор (индуктор)	Статор
Статор	Ротор (индуктор)
→	→
→	→
→	→

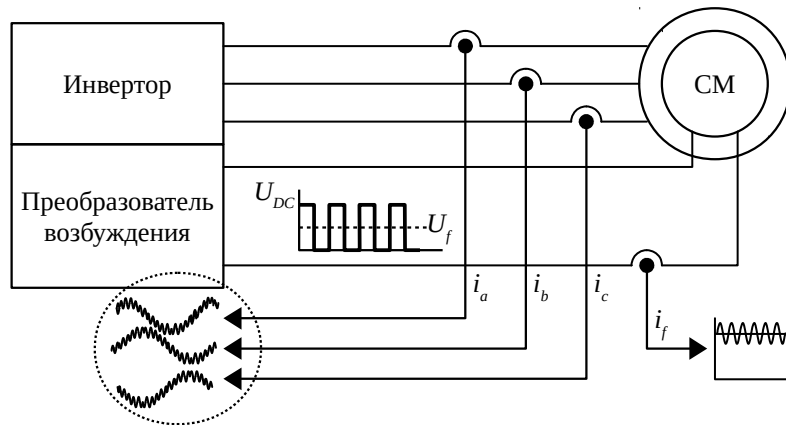


Рис.1 Оценивание текущего углового положения ротора по пульсациям тока возбуждения

В работе рассмотрим способ косвенного определения углового положения ротора СМ при использовании в качестве источника тестирующего сигнала напряжение (ток) обмотки возбуждения.

В системах управления СМ для питания обмотки возбуждения широко используется импульсный преобразователь напряжения (DC/DC-чоппер) или управляемый тиристорный преобразователь. Ток возбуждения будет содержать переменную составляющую, связанную с особенностями работы преобразователя. Благодаря электромагнитной взаимосвязи между обмотками ротора и статора, наличие переменной составляющей тока возбуждения вызовет изменение основного магнитного потока и, как следствие, возникновение переменной составляющей статорной обмотки той же частоты, что и тока возбуждения [8]. Схема оценивания текущего углового положения ротора по пульсациям тока возбуждения представлена на рис.1.

Рабочая частота DC/DC преобразователя возбуждения, должна быть выбрана на порядок выше максимальной рабочей частоты СМ. Также крайне важно, чтобы инвертор при работе не создавал гармонических составляющих тока в том же частотном диапазоне, что и преобразователь возбуждения.

Приведем уравнения СМ без демпферной обмотки в двигательном режиме работы в системе координат dq жестко связанной с ротором. При условии малой частоты вращения ротора пренебрежем составляющей от ЭДС вращения:

$$U_{sd} \approx R_s \cdot I_{sd} + \frac{L_d \cdot dI_{sd}}{dt} + \frac{L_m \cdot dI_f}{dt}, \quad (1)$$

$$U_{sq} \approx R_s \cdot I_{sq} + \frac{L_q \cdot dI_{sq}}{dt}, \quad (2)$$

$$U_f \approx R_f \cdot I_f + \frac{L_m \cdot dI_{sd}}{dt} + \frac{L_f \cdot dI_f}{dt}, \quad (3)$$

где U_{sd} , I_{sd} – напряжение и ток обмотки статора по оси d ; U_{sq} , I_{sq} – напряжение и ток обмотки статора по оси q ; R_s – активное сопротивление статора; L_d – индуктивные сопротивления по продольной оси; L_m – взаимная индуктивность между продольной осью статора и ротора; L_q – индуктивные сопротивления по поперечной оси; U_f , I_f – напряжение и ток обмотки возбуждения ротора; R_f – активное сопротивление обмотки возбуждения; L_f – индуктивность обмотки возбуждения.

Уравнение электромагнитного момента СМ:

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [L_m I_f \cdot I_{sq} + (L_d - L_q) \cdot I_s \cdot I_{sq}], \quad (4)$$

где p – количество пар полюсов.

С учетом наличия переменной составляющей тока возбуждения справедливо:

$$I_f \approx I_{f-} + I_{f\sim} = I_{f-} \cdot (1 + k_f \cdot \sin \omega \cdot t), \quad (5)$$

где I_{f-} , $I_{f\sim}$ – постоянная и переменная составляющей тока возбуждения, соответственно; k_f – амплитуда пульсаций тока возбуждения; ω – угловая частота пульсаций тока.

Пренебрегая падением напряжения в активном сопротивлении запишем уравнения баланса напряжений высокочастотной составляющей статорной обмотки:

$$U_{sd\sim} \approx \psi_{sd\sim} \approx \frac{L_d \cdot dI_{sd\sim}}{dt} + L_m \cdot \frac{dI_{f\sim}}{dt}, \quad (6)$$

$$U_{sq\sim} \approx \psi_{sq\sim} \approx \frac{L_q \cdot dI_{sq\sim}}{dt}. \quad (7)$$

где $\psi_{sd\sim}$, $\psi_{sq\sim}$ – высокочастотные составляющие потокоцеплений по продольной и поперечной оси, соответственно.

При условии обеспечения системой регулирования высокочастотных составляющих статорных координат на нулевом уровне $\psi_{sd\sim} = 0, \psi_{sq\sim} = 0$, получаем, что высокочастотная составляющая тока статора будет направлена продольно. Подставляя (5) в (6) получаем:

$$I_{sd\sim} = -\frac{L_m}{L_d} \cdot I_{f\sim} \cdot k_f \cdot \sin \omega \cdot t \quad (8)$$

Рассмотренный способ оценивания углового положения ротора изображен на рис. 2. На нём система координат dq жестко связана с ротором и представляет фактическое угловое положение, в осях $d_e q_e$ происходит оценивание углового положения. $\alpha\beta$ – неподвижная система координат, связанная со статором.

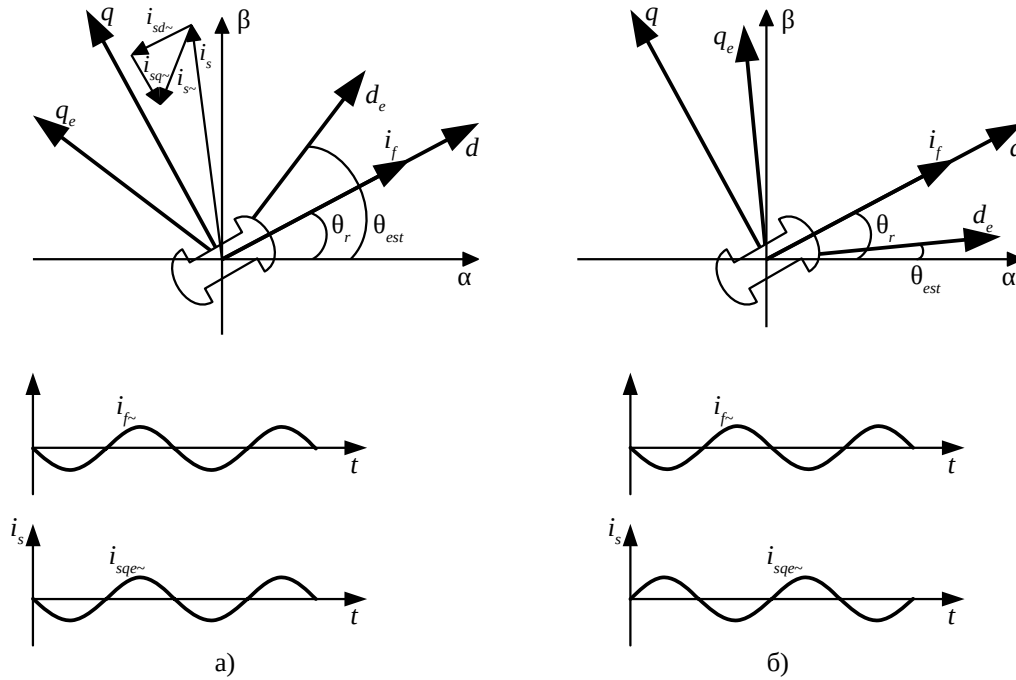


Рис. 2 Ошибка между оцененным и фактическим угловым положением ротора и реакция тока статора на изменения тока возбуждения

Идея основана на том факте, что в неподвижном состоянии обмотка возбуждения связана с осью d , если пренебречь перекрестным насыщением. Следовательно, высокочастотный сигнал в оцениваемой q -оси будет присутствовать только в том случае, если положение ротора оценено неправильно. Таким образом, оценка положения ротора может быть достигнута путем минимизации высокочастотного тока в оцениваемой q -оси.

Если составляющие тока статора $I_{sq\sim}, I_{sd\sim}$ известны, они могут быть преобразованы к вращающейся системе координат оценивания $d_e q_e$ с помощью:

$$T_{dq \rightarrow d_e q_e} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r - \theta_{est}) & \sin(\theta_r - \theta_{est}) \\ -\sin(\theta_r - \theta_{est}) & \cos(\theta_r - \theta_{est}) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Так преобразованная высокочастотная составляющая тока по поперечной оси:

$$I_{sqe\sim} = -\sin(\theta_r - \theta_{est}) \cdot I_{sd\sim} \quad (10)$$

Подставляя (8) в (10), получим:

$$I_{sqe\sim} = \frac{L_m}{L_d} \cdot I_{f\sim} \cdot k_f \cdot \sin \omega \cdot t \cdot \sin(\theta_r - \theta_{est}) \quad (11)$$

Помножим правую и левую часть уравнения (11) на $\omega \cdot t$, получаем:

$$I_{sqe\sim} \cdot \sin \omega \cdot t = \frac{L_m}{2 \cdot L_d} \cdot I_{f\sim} \cdot k_f \sin(\theta_r - \theta_{est}) - \frac{L_m}{2 \cdot L_d} \cdot I_{f\sim} \cdot k_f \sin(\theta_r - \theta_{est}) \cdot \cos 2 \omega \cdot t \quad (12)$$

Выделенное путем фильтрации $I_{sqe\sim} \cdot \sin \omega \cdot t$ значение, позволяет получить зависимость угла рассогласования:

$$(I_{sqe\sim} \cdot \sin \omega \cdot t)^{FILTR} = \frac{L_m}{2 \cdot L_d} \cdot I_{f\sim} \cdot k_f \sin(\theta_r - \theta_{est}) \quad (13)$$

Приведенная в (12) зависимость – функция угла рассогласования между оцененным и реальным значениями углового положения ротора.

Преобразовывая (13), выделим $\theta_r - \theta_{est}$:

$$\theta_r - \theta_{est} = \arcsin \left(\frac{2 \cdot L_d}{L_m \cdot I_f \cdot k_f} \cdot (I_{sqe} \cdot \sin \omega_r t)^{FILTR} \right) \quad (14)$$

Безусловно, использование описания электромагнитных процессов в СМ на основании линеаризованных уравнений не дает возможности учесть физические свойства СМ, при протекании «тестовых» (высокочастотных) сигналов. Для более точного вычисления текущего углового положения, возможно, необходимо учесть влияние насыщения СМ, в частности влияние перекрестного насыщения (англ. cross-coupling magnetic saturation effect). Предполагается рассмотреть эти вопросы в будущем и опубликовать результаты исследования.

Выводы. В статье рассмотрен вопрос косвенного определения углового положения ротора синхронной машины с электромагнитным возбуждением при работе в зоне малых скоростей с использованием «тестирующих» сигналов. На основании наличия обмотки возбуждения, предложено в качестве источника тестирующего сигнала использовать обмотку возбуждения, т.к. используемые DC/DC преобразователи для систем возбуждения СМ при своей работе создают естественные пульсации тока. Приведены необходимые функциональные зависимости для проведения имитационного моделирования или физического эксперимента по косвенному определению углового положения ротора СМ при работе в зоне низких скоростей.

Список литературы: 1. Яровой Г. И. Система инверторного запуска тепловозного дизеля тяговым синхронным генератором / Г.И. Яровой, Р.В. Канунников, Н.В. Анищенко // Вісник Східно-українського нац. університету ім. Володимира Даля. – Л.: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2012. – № 5(176). – Ч. 1. – С. 161 – 163. 2. J. Holtz, "State of the art of controlled AC drives without speed sensor," Proceedings of 1995 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. PEDS 95, 1995, pp. 1-6 vol.1. doi: 10.1109/PEDS.1995.404956 3. F. Cupertino, G. Pellegrino, P. Giangrande and L. Salvatore, "Sensorless Position Control of Permanent-Magnet Motors With Pulsating Current Injection and Compensation of Motor End Effects," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 3, pp. 1371-1379, May-June 2011. doi: 10.1109/TIA.2011.2126542. 4. S. C. Yang and R. D. Lorenz, "Comparison of resistance-based and inductance-based self-sensing controls for surface permanent-magnet machines using high-frequency signal injection," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 3, pp. 977-986, May-June 2012. doi: 10.1109/TIA.2012.2191254. 5. S. Bolognani, S. Calligaro, R. Petrella and M. Tursini, "Sensorless control of IPM motors in the low-speed range and at stand-still by HF-injection and DFT processing," 2009 *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, Miami, FL, 2009, pp. 1557-1564. doi: 10.1109/IEMDC.2009.5075411. 6. X. Deng, L. Wang, J. Zhang and Z. Ma, "Rotor Position Detection of Synchronous Motor Based on High-frequency Signal Injection into the Rotor," 2011 *Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Shanghai, 2011, pp. 195-198. doi: 10.1109/ICMTMA.2011.619. 7. M. Okubo and S. Nishikata, "A sensorless starting method for self-controlled synchronous motors without damper windings using a DC chopper in the exciter circuit," 2011 *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Beijing, 2011, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICEMS.2011.6073524. 8. Alakula, M., "On the control of saturated synchronous machines," *Power Electronics and Variable-Speed Drives, 1994. Fifth International Conference on*, vol., no., pp.386,389, 26-28 Oct 1994. 9. Rambetius, A.; Piepenbreier, B., "Sensorless control of wound rotor synchronous machines using the switching of the rotor chopper as a carrier signal," *Sensorless Control for Electrical Drives and Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (SLED/PRECEDE), 2013 IEEE International Symposium on*, vol., no., pp.1,8, 17-19 Oct. 2013. 10. Яровой Г.И. Определение начального углового положения ротора синхронного генератора в бездатчиковой системе инверторного запуска дизель-агрегата / Г.И. Яровой, Р.В. Канунников, Н.В. Анищенко // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып.: Проблемы автоматизированного электропривода. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2013. – № 36 (1009). – С. 475-477.

Bibliography (bilingualized): 1. Jarovoj G.I. Sistema invertornogo zapuska teplo-voznogo dizelja tyagovym sinhronnym generatorom [The Inverter System Startup Diesel Synchronous Traction Generator], (2012), *Visnik Shidno-Ukrains'kogo nac. Universitetu im. Volodimira Dalja*, Lugans'k, Ukraine, Vid-vo SNU im2. J. Holtz, "State of the art of controlled AC drives without speed sensor," Proceedings of 1995 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. PEDS 95, 1995, pp. 1-6 vol.1. doi: 10.1109/PEDS.1995.404956 3. F. Cupertino, G. Pellegrino, P. Giangrande and L. Salvatore, "Sensorless Position Control of Permanent-Magnet Motors With Pulsating Current Injection and Compensation of Motor End Effects," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 3, pp. 1371-1379, May-June 2011. doi: 10.1109/TIA.2011.2126542. 4. S. C. Yang and R. D. Lorenz, "Comparison of resistance-based and inductance-based self-sensing controls for surface permanent-magnet machines using high-frequency signal injection," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 3, pp. 977-986, May-June 2012. doi: 10.1109/TIA.2012.2191254. 5. S. Bolognani, S. Calligaro, R. Petrella and M. Tursini, "Sensorless control of IPM motors in the low-speed range and at stand-still by HF-injection and DFT processing," 2009 *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, Miami, FL, 2009, pp. 1557-1564. doi: 10.1109/IEMDC.2009.5075411. 6. X. Deng, L. Wang, J. Zhang and Z. Ma, "Rotor Position Detection of Synchronous Motor Based on High-frequency Signal Injection into the Rotor," 2011 *Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Shanghai, 2011, pp. 195-198. doi: 10.1109 / ICMTMA.2011.619. 7. M. Okubo and S. Nishikata, "A sensorless starting method for self-controlled synchronous motors without damper windings using a DC chopper in the exciter circuit," 2011 *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Beijing, 2011, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICEMS.2011.6073524. 8. Alakula, M., "On the control of saturated synchronous machines," *Power Electronics and Variable-Speed Drives, 1994. Fifth International Conference on*, vol., no., pp.386,389, 26-28 Oct 1994. 9. Rambetius, A.; Piepenbreier, B., "Sensorless control of wound rotor synchronous machines using the switching of the rotor chopper as a carrier signal," *Sensorless Control for Electrical Drives and Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (SLED/PRECEDE), 2013 IEEE International Symposium on*, vol., no., pp.1,8, 17-19 Oct. 2013. 10. Yarovoy H.Y., R.V. Kanunnikov, N.V. Anyshchenko, "Opredelenye nachal'nogo uhlovoho polozhenyia rotora synkhronnoho heneratora v bezdatchykovoy systeme ynvertornogo zapuska dyzel'-ahrehata" *Vestnik Nac. tehn. un-ta "HPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Problemy avtomatizirovannogo jelektroprivoda*. No. 36 (1009). Kharkiv: NTU "HPI", 2013. 475-477.

Поступила 17.07.2017