

Изследване влиянието на LC филтър върху работата на системата инвертор–безчетков двигател за постоянен ток

Иван П. Мараджиев, Емил И. Динков, Цветана Г. Григорова

Технически университет – София, филиал Пловдив, Катедра “Електроника”,
бул. “Санкт Петербург” № 63, 4000 Пловдив
e-mail: maradzhatata@yahoo.com, emildinkov@yahoo.com, c_gr@tu-plovdiv.bg

Investigation of the influence of a LC-filter upon operation mode of the system voltage source inverter - brushless dc motor

Ivan P. Maradzhiev, Emil I. Dinkov, Tsvetana G. Grigорова

Technical University of Sofia Branch Plovdiv, Electronics Department, 63, Sankt Petersburg Blvd

Abstract: Brushless DC motors (BLDC) are widely used in many industrial applications. It is necessary to provide small ripple torque of brushless motor and ensure the required EMC according to the working environment. The paper presents the investigation of the influence of passive LC filter connected between the voltage inverter and the BLDC on the torque and the harmonic composition of voltage and current in the motor. The presented results are obtained by computer simulation of a BLDC and confirmed experimentally by a real electromotive system.

Резюме: Безчетковите двигатели за постоянен ток намират широко приложение в различни индустриални приложения. Това налага необходимостта от осигуряване на малки пулсации на въртящия момент на безчетковия двигател и гарантиране на необходимата електромагнитна съвместимост според изискванията на работната среда. В настоящия доклад се изследва влиянието на нискочестотен LC филтър, включен между инвертор на напрежение и безчетков двигател за постоянен ток, с цел намаляване на пулсациите на въртящия момент и подобряване на хармоничния състав на тока през двигателя. Представените резултати са получени чрез компютърно симулиране на електрозадвижване с безчеткова машина и опитно потвърдени посредством реална електрозадвижваща система.

1. Въведение

Поради своите предимства пред конвенционалните постояннотокови и асинхронни машини, безчетковите машини намират приложение във все повече области на техниката. Теоретично, за да се постигне постоянен въртящ момент трябва да се избере подходяща форма на тока през фазовите намотки на безчетковата машина. В идеалния случай, при използване на шест стъпков алгоритъм на управление, за да се постигне постоянен въртящият момент, фазовия ток за постояннотоковите безчеткови машини представлява правоъгълни импулси [1]. Но физически е невъзможно да се генерират идеални правоъгълни импулси, защото токовете трябва да правят мигновен преход от една стойност в друга. В

действителност този преход има крайно време. В резултат на това се получават пулсации във въртящия момент при всяко комутиране на фазов ток. Използвайки различните методи за управление и контрол на безчетковите машини, електронните ключове в силовите блокове, захранващи този тип двигатели, се превключват с висока честота. Това води до влошаване на електромагнитната съвместимост.

Известни са редица варианти, свързани с решаването на посочените по-горе проблеми [2,3,4]. В настоящия доклад се изследва ефекта от включването на нискочестотен LC филтър между изхода на инвертор на напрежение и безчеткова машина. LC филтърът е включен във схема „звезда“. Системата е моделирана и симулирана посредством програмнен симулатор PSIM. Получените резултати са сравнени с резултати снети от реална установка.

2. Математическо описание на безчетков двигател за постоянен ток и принцип на шест стъпков алгоритъм на работа.

На фиг. 1 е представена принципна схема за управление на безчетков двигател за постоянен ток, като управляващите импулси са синтезирани при шест стъпков алгоритъм на управление. Обикновено за управление на параметри, като скорост или въртящ момент се използва широчинно-импулсна модулация [1].

Математически трифазна безчеткова машина може да се опише със следните уравнения:

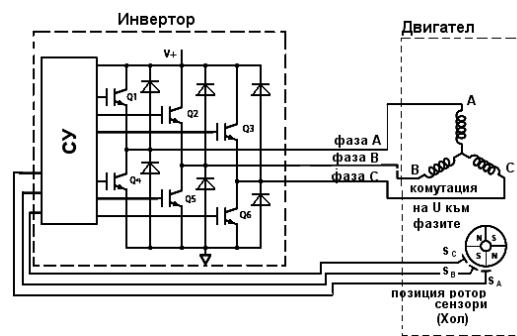
$$(1) \begin{cases} v_a = R \cdot i_a + (L - M) \cdot \frac{di_a}{dt} + E_a \\ v_b = R \cdot i_b + (L - M) \cdot \frac{di_b}{dt} + E_b \\ v_c = R \cdot i_c + (L - M) \cdot \frac{di_c}{dt} + E_c \end{cases}$$

където: v_a , v_b и v_c са фазовите напрежения на машината, i_a , i_b и i_c са фазовите токове, R е активното съпротивление на фазовите намотки, L е собствената индуктивност на намотките, M е взаимната индуктивност между намотките, и E_a , E_b и E_c са обратните е.д.н. съответно на фази А, В и С. Обратното е.д.н. е функция на скоростта на въртене на ротора и положението на ротора θ_r по следния начин:

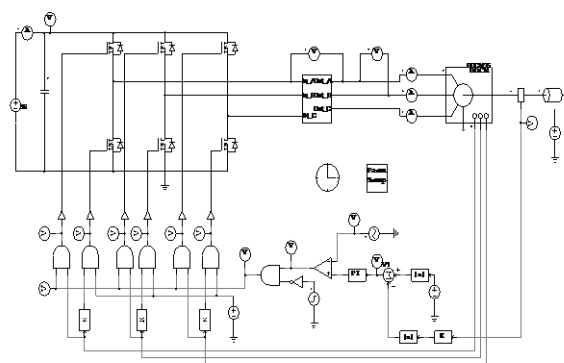
$$(2) \begin{cases} E_a = k_{ea} \cdot \omega_m \\ E_b = k_{eb} \cdot \omega_m \\ E_c = k_{ec} \cdot \omega_m \end{cases}$$

където коефициентите k_{ea} , k_{eb} и k_{ec} зависят от положението на ротора θ_r .

Въртящият момент, развиван от машината е съответно равен на:



Фиг. 1



Фиг. 2. Принципна електрическа схема на симулираната система в симулатора PSIM

Таблица 1

R, [Ω]	L, [uH]	Tm, [Nm]	Ω, [rpm]	Ke, [rpm/V]
0.0065	55	32	5000	50

$$(3) \quad T_{em} = \frac{E_a \cdot i_a + E_b \cdot i_b + E_c \cdot i_c}{\omega_m}$$

3. Симуляционни и експериментални резултати

В средата на симулатора PSIM е реализирана електрозадвижваща система за управление на безчетков двигател – фиг.2. Използва се шест стъпков алгоритъм на управление на безчетковия двигател. Системата се състои от безчетков двигател за постоянен ток, трифазен инвертор на напрежение, регулатор на скорост и схема за управление на включването на транзисторите от инверторния мост. Върху горните транзистори от рамената на инвертора на напрежение се прилага широчинно-импулсна модулация с честота от 26,5kHz. В модела на безчетковия двигател са заложили параметрите на двигател тип ME0913, посочени в таблица 1.

На фиг. 3 е показана формата на линейното напрежение U_{AB} при задание по скорост от 1500rpm, а на фиг. 4 съответния хармоничен състав. При захранващо напрежение от 64V в установен режим на работа коефициента на запълване на използваната широчинно импулсна модулация е около 50%. Вижда се, че амплитудата на напрежените пикове породени в моментите, когато се комутира тока от едното в другото рамо на инверторния мост, са с амплитуда позволяваща отпушването на обратните диоди на транзисторите и прогичане на ток към захранващия източник. Ясно са изразени хармоничните съставящи, групирани около модулационната честота от 26,5kHz.

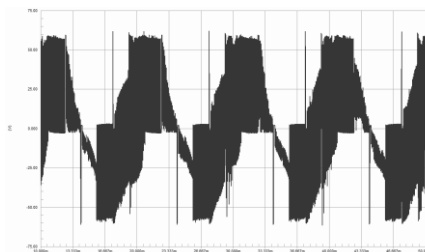
Коефициентът на хармонични изкривявания THD е 61.753%.

Аналогично за коефициента на хармонични изкривявания на фазовия ток се получава: THD= 75.651%. В хармоничния състав присъстват високочестотни съставни около модулационната честота.

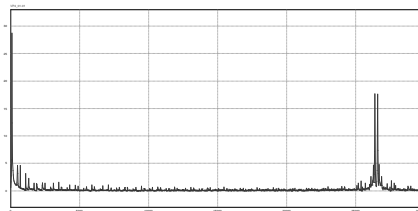
Следващият етап от изследванията се състои в поставяне на филтър между инвертора на напрежение и безчетковия двигател за постоянен ток. Схемата на свързване на филтъра е представена на фиг. 5. Стойността на филтровите индуктивности е 87,5uH, а на филтровите кондензатори е 150uF.

На фиг. 6 е представена формата на линейното напрежение U_{AB} върху двигателя след включване на филтъра. Вижда се, че амплитудата на напрежените пикове, породени в моментите, когато се комутира тока от едното в другото рамо на инверторния мост, значително намалява. Намалява обмяната на енергия между инвертора и захранващия източник.

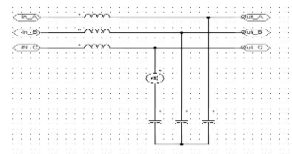
На фиг. 7 е показан хармоничния състав на



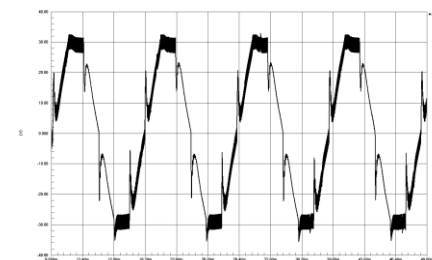
Фиг. 3. Линейно напрежение U_{AB} без включен LC филтър



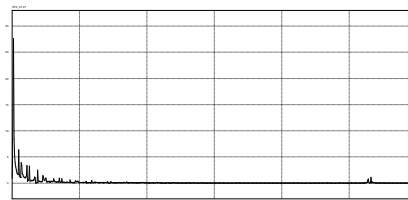
Фиг. 4. Хармоничен анализ на хармоничния състав на линейното напрежение U_{AB} без



Фиг. 5. Схема на използвания LC филтър



Фиг.6. Линейно напрежение U_{AB} при с поставен LC филтър



Фиг. 7. Хармоничен анализ на линейното напрежение с включен LC филтър

линейното напрежение. Ясно се вижда, че амплитудата на високочестотните хармоници около модулационната честота значително е намалена.

Стойността на коефициента на хармонични изкривявания за линейното напрежение е $\text{THD}=13.866\%$. Високочестотните съставни около модулационната честота са филтрирани. За фазовия ток стойността на коефициента на хармонични изкривявания е $\text{THD} = 36.631\%$

На фиг. 8 и фиг. 9 са представени въртящият момент развиван от двигателя без и с включен LC филтър. В момента от 0,8s управлението на машината се спира, тя спира по инерция и въртящият момент става равен на нула. Поради това, че се затваря токов контур между LC филтъра, безчетковия двигател за постоянен ток и долните транзистори от инвертора започва да се генерира от машината отрицателен въртящ момент след спиране на управлението.

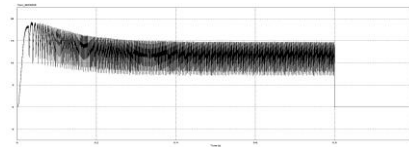
На фиг.10 е показана осцилограма на линейното напрежение между две от фазите на безчетковия двигател без включен LC филтър при изследване на процесите в реалната електрозадвижваща система. На фиг. 11 е представено същото напрежение след включване на LC филтъра между инвертора и безчетковия двигател.

Изводи: От направените изследвания се установи, че при поставяне на LC филтър между инвертора на напрежение и безчетковия двигател за постоянен ток се филтрират високочестотните съставлящи от хармоничния състав на тока, протичащ през двигателя. Също така значително се намалява амплитудната стойност на високочестотните съставлящи от хармоничния състав на линейното напрежение, прилагано върху двигателя. При наличие на LC филтър, когато управлението на инвертора се изключи и машината започне да спира по инерция протича ток през долните транзистори от инвертора, LC филтъра и безчетковата машина. Този ток води до получаването на малък отрицателен въртящ момент, който се стреми да спре двигателя. При липса на LC филтър и при спиране на двигателя по инерция не се наблюдава този процес.

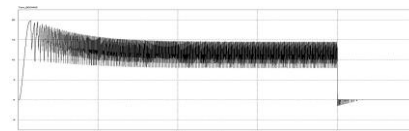
"Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани от Вътрешния конкурс на ТУ-София-2014г."

Литература

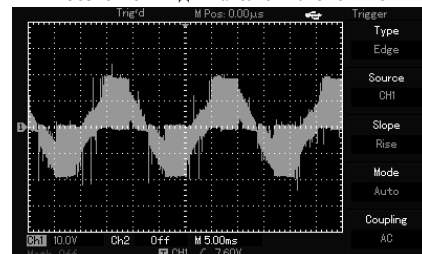
- [1] Динкова М., И. Мараджиев, Е. Динков, *Принципи на управление на 3-фазни безчеткови постояннотокови електродвигатели*, Научни трудове Том LX "Хранителна наука, техника и технологии – 2013", стр. 201-205
- [2] Albert Rajan A., S. Vasantharathna, *Harmonics and Torque Ripple Minimization using L-C Filter for Brushless DC Motors*, International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol 2, No. 5, November 2009
- [3] Gulez K., A. Adam, *Using passive filters to minimize torque pulsations and noises in surface PMSM derived field oriented control*, Simulation Modelling Practice and Theory 15 (2007)
- [4] Wael A., D. Ishak, *Minimization of torque ripples in BLDC motors due to phase commutation*, ISSN 0033-2097, R. 87 NR 1/2011



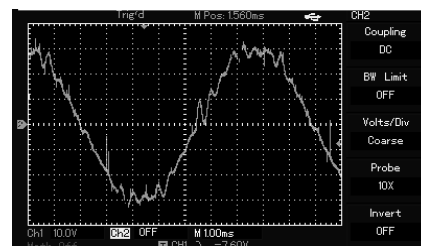
Фиг. 8. Въртящ момент на безчетковия двигател без включен LC филтър



Фигура 9. Въртящ момент на безчетковия двигател с включен LC



Фиг. 10. Линейно напрежение без включен LC филтър



Фиг. 11. Линейно напрежение с LC филтър