

APPLICATION OF AN ASYMMETRIC BRIDGE CONVERTER IN SWITCHED RELUCTANCE MOTOR (SRM) DRIVES

Georgi Kostov, Romeo Alexandrov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia, E-mail: georgi_kostov@mgu.bg, romeo.alexandrov@mgu.bg

ABSTRACT. Switched reluctance motors (SRMs) cannot operate directly connected to the electrical supply; for this reason, they operate in conjunction with a power electronic commutator – a converter that sequentially switches the phase windings in synchronism with the angular position of the rotor. Selection of a power electronic converter in the SRM electric drive is essential for ensuring control with high efficiency and safety. Depending on the motor speed, different parameters are obtained when using different DC/DC converters, such as torque, rms current, etc. An important condition when selecting a suitable converter is independent phase control, as well as reducing torque ripple. The asymmetric bridge converter is the most common topology for controlling an SRM due to its reliability and independent phase control. The article discusses the converter scheme, the phase switching order, and a comparison between hard and soft commutation of the converter is made.

Keywords: switched reluctance motor (SRM), asymmetric bridge converter, model, control.

ПРИЛОЖЕНИЕ НА АСИМЕТРИЧЕН МОСТОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ В ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНИЯ С ПРЕВКЛЮЧВАЕМ РЕАКТИВЕН ДВИГАТЕЛ (ПРД)

Георги Костов, Ромео Александров

Минно-геоложки университет “Св. Иван Рилски”, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Превключваемите реактивни двигатели (ПРД) не могат да работят директно свързани към електрическото захранване; поради тази причина, те работят съвместно със силов електронен комутатор - преобразувател, който последователно превключва фазните намотки в синхронизъм с ъгловото положение на ротора. Изборът на силов електронен преобразувател в електрозадвижването с ПРД е от съществено значение за осигуряване на управление с висока ефективност и сигурност. В зависимост от скоростта на въртене на двигателя при използването на различни DC/DC преобразуватели се получават различни параметри, като момент, средноквадратичен ток и др. Важно условие при избор на подходящ преобразувател е независимо управление на фазите, както и намаляване на пулсациите на момента. Асиметричният мостов преобразувател е най-често срещаната топология за управление на ПРД поради своята надеждност и независимо управление на фазите. В доклада е разгледана схемата на преобразувателя, реда на превключване на фазите, както и е направено сравнение между твърда и мека комутация на преобразувателя.

Ключови думи: превключваем реактивен двигател (ПРД), асиметричен мостов преобразувател, модел, управление.

Въведение

Необходимостта от наличието на DC/DC преобразувател (силов електронен комутатор) в структурата на електрозадвижвания с превключваем реактивен двигател (ПРД) се обуславя от принципа му на работа, а именно нуждата от последователно превключване на фазните намотки в синхронизъм с ъгловото положение на ротора. Първоначално са били използвани механични комутатори за превключване на фазите, те са с множество недостатъци, като ниско бързодействие, ограничаване на работната честота, кратък срок на експлоатация, наличие на електрическа дъга със съответните последици – бързо износване на контактите и създаване на силни електромагнитни смущения. За първи път през 1930 г. се заменя механичният комутатор с електронен, използван в построения от Brown Boveri локомотив за швейцарските железници. Използван е шест аноден живачно-дъгов изправител. Вследствие на развитието на електрониката и предимствата на ПРД редица учени се насочват към анализиране и усъвършенстване на електрозадвижвания с тях. Доказателство за това е и все повече инсталираните двигатели в индустрията, както и подмяна на вече съществуващи с превключвани реактивни двигатели. Тъй като въртящият момент на ПРД не зависи от полярността на тока, защото зависи от квадрата на тока (i^2), е необходим един превключвател на фаза за управление на тока.

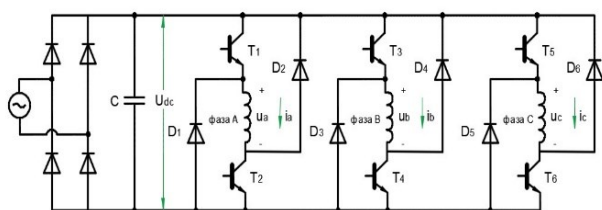
Обикновено желаната форма на всеки фазов ток е правоъгълна, ето защо е изключително важно да се

използват преобразуватели, които могат да работят с мека и твърда комутация.

Асиметричен мостов DC/DC преобразувател

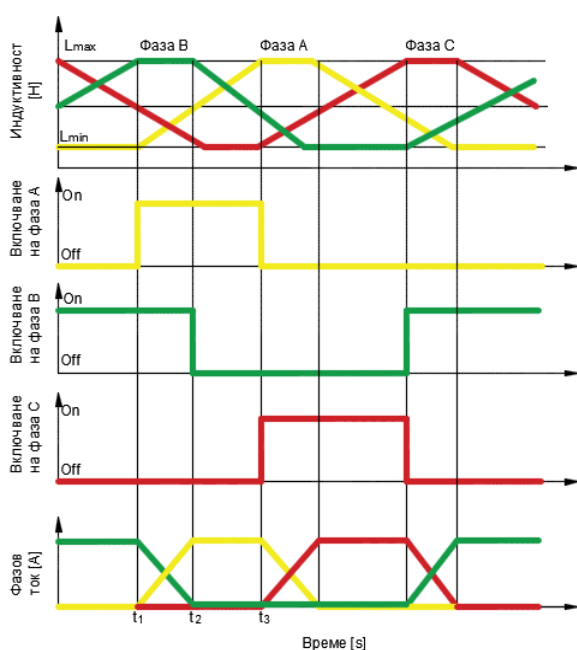
Тук се разглеждат и анализират режимите на работа на асиметричен мостов DC/DC преобразувател. В доклада на Костов и Александров (2024) е направена класификация на преобразувателите, използвани в електрозадвижвания с ПРД, като част от структурата на тези системи. Описани са основните изисквания, на които трябва да отговарят тези преобразуватели. В много случаи поради своите предимства асиметричният мостов преобразувател е предпочитан за използване в електрозадвижвания с превключвани реактивни двигатели. В повечето случаи се налага комутаторите да се захранят от променливотоковата мрежа, поради тази причина се снабдяват с токоизправители. На постояннотоковата шина се присъединява кондензатор, който служи за обмен на реактивна енергия с двигателя. Наличието му е абсолютно необходимо поради еднопосочната проводимост на изправителя. Освен това той изпълнява функцията на филтър, като изглажда пулсациите на изправеното напрежение и запасява енергия за покриване на импулсния характер на тока, черпен от преобразувателя и двигателя. Важно предимство на асиметричния мостов преобразувател е възможността за независимо управление на токовете във всяка от фазите, следователно и добро управление на въртящия момент. Като недостатък може да

се отбележи наличието на повече полупроводникови елементи. Схемата на асиметричен мостов DC/DC преобразувател е показана на фиг. 1.



Фиг. 1. Асиметричен мостов преобразувател

За опростяване режимите на работа се разглеждат за една от фазите, за другите фази режимите са аналогични. На фиг. 2 е показана работата на асиметричен мостов DC/DC преобразувател съвместно с ПРД.

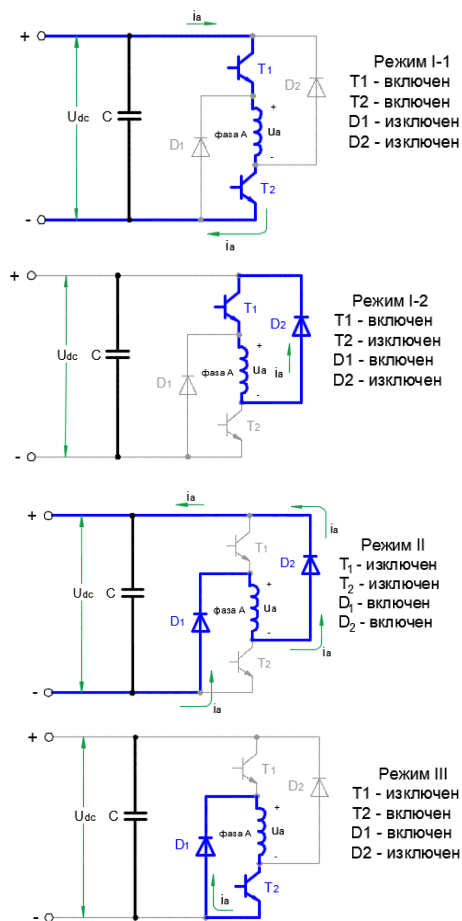


Фиг. 2. Съвместна работа на ПРД с асиметричен мостов преобразувател

Важно е да се отбележи, че в момента t_1 фаза A е включена, а фаза B е изключена, токът обаче не нараства или спада моментално поради индуктивността на фазите. На фиг. 2 се вижда, че токът във фаза A достига своята зададена стойност в момент t_2 , когато фаза B е размагнетизирана и нейният ток е нула. Между двете времена t_1 и t_2 фази A и B провеждат едновременно.

На фиг. 3 са показани режимите на работа на преобразувателя (за фаза A). Режим I-1 съответства на време t_1 , тогава са включени транзисторите T_1 и T_2 , токът във фазата започва да нараства до неговата зададена стойност. Ако той не се управлява може да достигне много високи стойности. Токът на фаза A достига своята зададена стойност във време t_2 , когато на фаза B токът е нула. Между времената t_1 и t_2 фази A и B провеждат едновременно.

Подобен анализ е направен и от Greger et al. (2026). Този период от време е основен източник на пулсации на момента на ПРД.



Фиг. 3. Режими на работа на асиметричен мостов преобразувател – фаза A

За трите времена изменението на тока може да се представи чрез следните формули:

$$\frac{di}{dt} = \frac{u - R_s i - i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_r}{L} \quad \text{за режим I} \quad (1)$$

$$\frac{di}{dt} = - \frac{u - R_s i - i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_r}{L} \quad \text{за режим II} \quad (2)$$

$$\frac{di}{dt} = - \frac{R_s i - i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_r}{L} \quad \text{за режим III,} \quad (3)$$

където:

u – захранващо напрежение, [V]

R_s – съпротивление на статора, [Ω]

i – токът на фазата, [A]

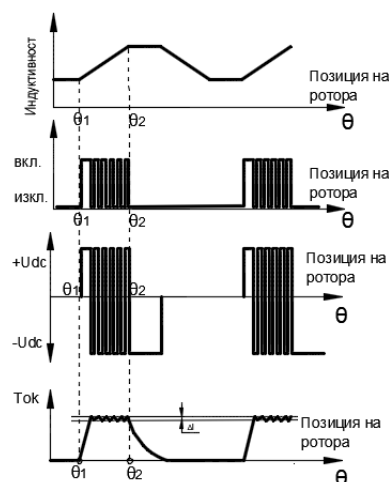
θ – ъгълът на позицията на ротора, [rad]

$L(\theta, i)$ – индуктивност на фазата като функция от θ и i , [H]

ω_r – ъглова скорост на ротора, [rad/s]

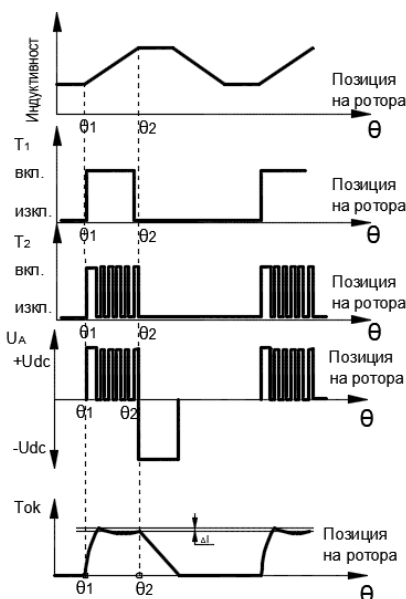
Редица автори се спират върху анализа на съвместната работа на асиметричния мостов преобразувател съвместно с ПРД (Miller, T. (2001), Krishnan, R. (2001), Emadi, A. et al. (2019)). При управлението на преобразувателя се прилагат два метода на превключване – биполарна модулация (твърда комутация) и еднополярна модулация (мека комутация). При твърдата комутация транзисторите T_1 и T_2

са включени, напрежението u_a е равно на захранващото напрежение U_{dc} , а фазовият ток i_a се увеличава, докато достигне своята номинална стойност, тогава T_1 и T_2 се изключват и фазовият ток протича през диодите D_1 и D_2 и кондензатора. Тогава приложеното напрежение върху фазовата намотка е U_{dc} , но с обратен знак и следователно токът намалява, докато достигне долната граница на хистерезиса. При тази комутация фазовият ток протича между DC шината и фазовата намотка в цикъл на постоянно превключване, което увеличава загубите на мощност, причинени от постоянното превключване и пулсациите на тока в кондензаторите. Този процес е показан на фиг. 4.



Фиг. 4. Биполарна модулация на асиметричен мостов преобразувател

Меката комутация може да се приложи за подобряване ефективността на преобразувателя. По време на интервала $\theta_1 - \theta_2$ транзисторът T_1 е винаги включен, а T_2 се включва и изключва, за да се управлява текущата стойност на тока. В този цикъл при изключен T_2 , фазовият ток протича през диода D_2 и транзистора T_1 . Напрежението на фазовата намотка u_a е равно на сумата от падовете на напрежението на D_2 и T_1 по време на проводимост. Тъй като този пад е с малка стойност, токът през намотката намалява бавно.



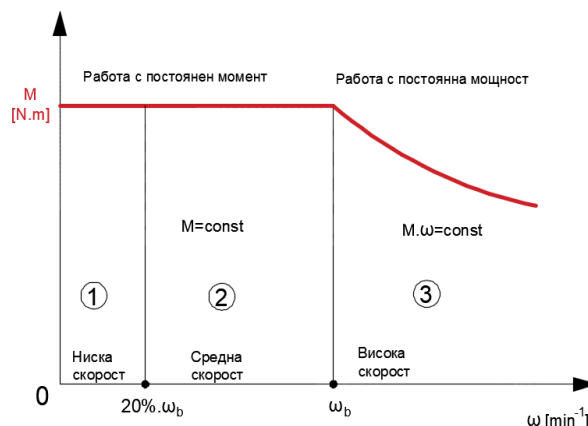
Фиг. 5. Еднополярна модулация на асиметричен мостов преобразувател

В края на токовия импулс, за да се намали бързо фазовият ток транзисторите T_1 и T_2 се запущат. След θ_2 стойността на тока намалява до нула – токът преминава през диодите D_1 и D_2 , както при твърда комутация. Тази модулация е показана на фиг. 5.

Реализацията на мека комутация предполага две състояния на полупроводниковите елементи по време на режим I-1 и режим I-2 съгласно фиг. 3.

На фиг. 6 е показана механичната характеристика на превключваем реактивен двигател. По отношение на скоростта можем да я разделим на **ниска скорост** до 20% от граничната, **средна скорост** – от 20% до 100 % от номиналната и **висока скорост** – над граничната.

До достигането на граничната скорост (ω_b) двигателят работи с постоянен момент, докато при скорости над граничната, той работи с постоянна мощност, както е показано на фигурата.



Фиг. 6. Механична характеристика на ПРД

Граничната скорост се определя от израза:

$$\omega_b = \frac{U_{dc}}{I \left. \frac{dL}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_m}} \quad (4)$$

По отношение на управлението, при ниски скорости се прилага мека и твърда комутация. При средна скорост освен това управление, се прилага управление и с промяна на ъглите на включване и изключване, а при електрозадвигания със скорости по-високи от граничната – импулсно управление.

При еднополярна модулация (мека комутация) може да се запишат следните изрази:

$$d_1 = \frac{I_p (R_s + \omega_m)}{U_{dc}} \quad (5)$$

$$I_{T_1} = \sqrt{\frac{1}{\theta_{rp}} \left\{ (I_p + \Delta i)^2 + \frac{\theta_a}{3} + \sqrt{\left\{ I_p^2 \frac{7}{3} \Delta i^2 \right\} \frac{\theta_c - \theta_a}{2} (1 + d_1)} \right\}} \quad (6)$$

$$\theta_{rp} = \frac{2\pi}{P_r}, \quad (7)$$

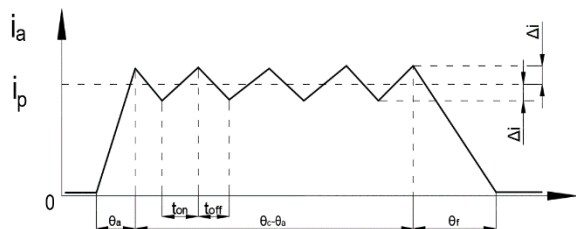
където:

θ_{rp} – стъпка на полюсите на ротора;

P_r – брой роторни полюси

$$I_{D1} \cong \frac{I_p}{\theta_{pr}} \left[(1-d_1) \frac{\theta_c - \theta_a}{2} + \frac{\theta_f}{2} \right] \quad (8)$$

Величините, участващи в уравненията са показани на фиг. 7.



Фиг. 7. Форма на тока при мека комутация на асиметричен мостов преобразувател

Величините са: I_{T1} – средноквадратичен ток, I_{D1} – среден ток, I_p – фазов ток, θ_c – ъгъл на проводимост, θ_a – ъгъл на изпреварване, θ_f – ъгъл на изключване, среден работен цикъл в областта $\theta_a - \theta_c - d_1$.

Krishnan (2001) разглежда разновидност на асиметричния преобразувател за приложение в електрозадвигващи системи на четирифазен двигател. При тази топология се използват две двойки транзистори съответно едната за фази А и С, и другата за фази В и D, като във веригата на всяка фаза се добавя тиристор. По този начин се намалява броят на транзисторите и диодите в схемата – това е основното предимство на схемата, както и по-честото използване на транзисторите – в случая вместо веднъж на четири цикъла, всеки транзистор се използва веднъж на два цикъла. Недостатъкът е наличието на тиристори, за които трябва отделно управление и допълнително охлаждане.

От направеното сравнение в Emadi, A. et al. (2019) на няколко преобразуватели, използвани в електрозадвигвания с ПРД се вижда, че пулсацията на момента до 3000 rpm нараства линейно, след което между 3000 rpm и 4000 rpm има скокообразно изменение, като от 4000 rpm до 5000 rpm не се изменя пулсацията на момента. Средноквадратичният ток остава неизменен независимо от скоростта на въртене.

Една от особеностите на електрозадвигванията с ПРД е зависимостта на индуцираното електродвижещо напрежение от скоростта на въртене. Тази зависимост се показва чрез формулата:

$$e = i \cdot \omega \cdot \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} = K_b \cdot i \cdot \omega, \quad (9)$$

където $\frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} = K_b$ е електромагнитна константа, която определя наклона на профила на индуктивността. Той е положителен при нарастваща индуктивност и отрицателен при намаляваща. При ниска скорост е валидно неравенството:

$$|e| < |U - i \cdot R| \quad (10)$$

При високите скорости комутацията трябва да се извърши по-рано в сравнение от тази при ниските скорости (намаляване на ъгъла на задържане) поради намаленото време за ограничаване на тока и желание да се избегне развиване на отрицателен въртящ момент.

Транзисторите са включени за кратко след преминаване на неподравненото положение и токът се повишава бързо поради малката индуктивност и малкото електродвижещо напрежение. В началото на припокриване на полюсите индуцираното електродвижещото напрежение (e) нараства бързо и надвишава захранващото напрежение. Това води

до отрицателен $\frac{di}{dt}$, а и следователно спад на тока. Колкото

по-висока е скоростта, толкова по-бързо ще спадне токът. Това води и до намаляване на произведения въртящ момент. Магнитният поток нараства линейно благодарение на постоянното напрежение приложено на намотката, когато се достигне ъгълът на изключване двата транзистора се изключват и токът преминава през диодите. Потокът спада линейно до нула поради отрицателното приложено напрежение върху намотката.

В доклада на Hamouda и Számel (2017) е направено сравнение на фазовия ток и индуктивността съответно при скорост 3000 и 9000 rpm, където графично е показана зависимостта на тока и индуктивността при различни скорости.

Заклучение

В заключение на изложеното дотук може да се отбележи, че асиметричния мостов преобразувател изпълнява изискванията, необходими за електрозадвигвания с превключвателни реактивни двигатели. Неговата ефективност се повишава при задвигвания с четирифазни двигатели (и с повече фази, кратни на две). Друг начин за ефективно използване на преобразувателя е използването на мека комутация. От голямо значение е скоростта на въртене, която оказва влияние върху индуцираното електродвижещо напрежение.

Литература

- Emadi, A., Jiang, J. Bilgin, B. (2019). *Switched Reluctance Motor Drives Fundamentals to Applications*. Boca Raton : Taylor & Francis Group, 2019. стр. 825.
- Greer, B., Akpolat, A., Serteller, N., Tosun, O., Gol, M. (2026). Data-Driven Sensorless Rotor Position Estimation for Switched Reluctance Motors Using a Deep LSTM Network, *Electronics*, Volume15, Issue 6, DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics15061330>
- Hamouda, M., Számel, L. (2017). Optimum Excitation Angles for Switched Reluctance Motor Drives. XXXIII. Kando Conference, Budapest, Hungary, pp. 128-142.
- Krishnan, R. (2001). *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications*. CRC Press, 2001.
- Miller, T. (2001). *Electronic control of switched reluctance machines*. Newnes, Reed Educational and Professional Publishing Ltd.
- Костов, Г., Александров, Р. (2024). Структура на система на електрозадвигване с превключваем реактивен двигател, Год на МГУ, т.67, стр. 228-235, <https://doi.org/10.5281/zenodo.13762846>.