

STRUCTURE OF AN ELECTRIC DRIVE SYSTEM WITH A SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Georgi Kostov, Romeo Alexandrov

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

ABSTRACT. Electric drives systems are the main consumers of electrical energy in industry. Most often, the annual energy costs of an electric drive are many times greater than its purchase value. Improving their technical and economic indicators is a priority worldwide. Electric drives built on the basis of switched reluctance motors (SRM) offer a working perspective. Due to their advantages, they are increasingly used in electric drives in the mining industry. The report examines the different switched reluctance motor (SRM) electric propulsion structures. The motor works together with a power electronic commutator - a converter that sequentially switches the phase windings in synchronism with the angular position of the rotor. Therefore, regardless of the control method, rotor position information is absolutely necessary. Basically, electric drives are divided into two main types (depending on whether information about the position of the rotor is received from a sensor or not): sensor and sensorless. The sensor carries a potential risk of damage and limits speed regulation due to the limitation of its resolving power. Because of this, research has recently been moving towards sensorless control. The report lists the requirements for the used converters and their classification, and analyses the operating modes of some of the most widely used converters. The main purpose of the report is to make a comparative analysis of the structures and functional blocks of electric drive with SRM in view of their potential for use in different applications, to which certain requirements are made.

Keywords: switched reluctance motor (SRM), electric drive, control, converter

СТРУКТУРА НА СИСТЕМА НА ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНЕ С ПРЕВКЛЮЧВАЕМ РЕАКТИВЕН ДВИГАТЕЛ

Георги Костов, Ромео Александров

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

РЕЗЮМЕ. Електрозадвигванията се явяват основен потребител на електрическа енергия в промишлеността. Най-често годишните енергийни разходи на едно електрозадвигване са многократно по-големи от неговата цена. Подобряването на технико-икономическите им показатели е приоритет в световен мащаб. Перспектива за работа предлагат електрозадвигванията, изградени на базата на превключваеми реактивни двигатели (ПРД). Поради техните предимства те ще намират все по-широко приложение в електрозадвигванията в минната индустрия. В доклада са разгледани различни структури на електрозадвигване с превключваем реактивен двигател (ПРД). Двигателят работи съвместно със силов електронен комутатор - преобразувател, който последователно превключва фазните намотки в синхронизъм с ъгловото положение на ротора. По тази причина, независимо от метода за управление, информация за позицията на ротора е абсолютно необходима. Основно електрозадвигванията се разделят на два основни типа (в зависимост от това дали се получава информация за позицията на ротора от сензор или не) – сензорни и безсензорни. Сензорът носи потенциален риск от повреда и ограничава регулирането на скоростта поради ограничението на разделителната му способност. Поради това в последно време изследванията се насочват към безсензорното управление. В доклада са изброени изискванията към използваните преобразуватели, направена е класификация и са анализирани състоянията на работа на едни от най-използваните преобразуватели. Основна цел на доклада е да се направи сравнителен анализ на структурите и функционалните блокове на електрозадвигване с ПРД с оглед на тяхната перспективност за различни приложения, към които се предявяват определени изисквания.

Ключови думи: превключваем реактивен двигател (ПРД), електрозадвигване, управление, преобразувател

Въведение

Електрозадвигванията се явяват основен потребител на електрическа енергия в промишлеността. Най-често годишните енергийни разходи на едно електрозадвигване са многократно по-големи от неговата цена. Подобряването на технико-икономическите им показатели е приоритет в световен мащаб. Перспектива за изследвания предлагат електрозадвигванията, изградени на базата на превключваеми реактивни двигатели (ПРД). Спецификата на електромеханичното преобразуване на енергията в електрозадвигванията с ПРД и особеностите на работа в промишлени условия, обуславят нарастващия брой изследвания по света. През 1972 г. Burnice Bedford получава два патента, свързани с управлението на ПРД. Според Fleadh Electronics преди 1976 г. са публикувани 67 патента и над 1775 до 1999 г., а статиите свързани с ПРД са 11 преди 1976 г. и над 1847 до 1999 г. Търсят се начини не само за оптимизация на параметрите на електродвигателите с оглед на тяхното приложение, но също така се предлагат находчиви решения за подобряване на тяхното управление. Въпреки напредъкът в разработването на електрозадвигванията с ПРД в световен мащаб те заемат сравнително малък дял от всички въведени в експлоатация регулируеми

задвигвания. В България тяхното използване е още по-ограничено и на практика липсва. Основната причина за относително слабото им разпространение са завишените изисквания към управляващата електроника, особено по отношение на бързодействието на изчислителната част. За да може да се осъществи непрекъснато движение на ротора е необходимо да се следи неговата позиция и малко преди достигане на т.н. подравнена позиция да се извърши комутация на фазата на двигателя. Определянето на ъгъла на комутацията е основна задача за ефективното управление на двигателя. Ъгълът на комутация се определя на база индуктивността на фазата, която има нелинейна зависимост от ъгъла на завъртане на ротора, на тока през намотката и на температурата. Необходими са мощни изчислителни и логически структури с голямо бързодействие за изпълнение на алгоритмите в реално време.

ПРД работи съвместно със силов електронен комутатор - преобразувател, който последователно превключва фазните намотки синхронно с ъгловото положение на ротора. По тази причина, независимо от метода за управление, информация за позицията на ротора е абсолютно необходима. Ъгловата позиция на ротора може да се измери директно с помощта на сензор - датчик за ъгъл на завъртане или да се изчисли на базата

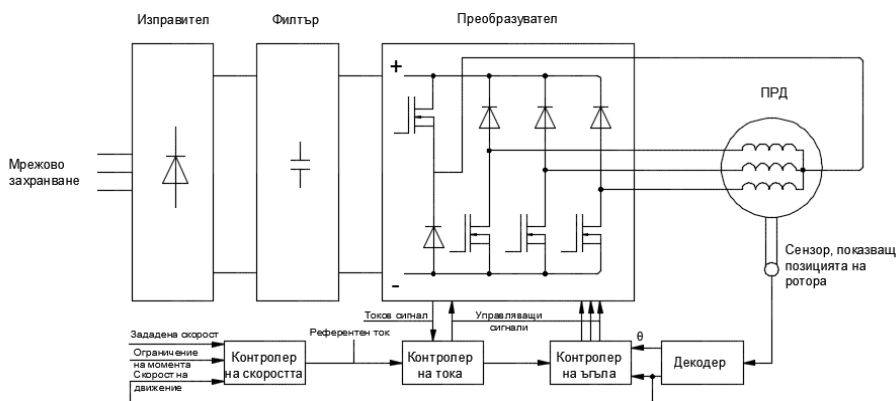
на текущите електрически параметри на двигателя, които са по-достъпни за измерване. Двете основни структури на електрозадвижане с превключваем реактивен двигател са със сензорно и безсензорно управление (Krishnan, 2001, Miller, 2001).

Сензорно управление

Електрозадвижането със сензорно управление (фиг. 1) се състои от: захранване, преобразувател, двигател, сензори и управляващо устройство - контролер. Двигателят преобразува електрическата енергия в механична за задвижане на товара. Контролерът

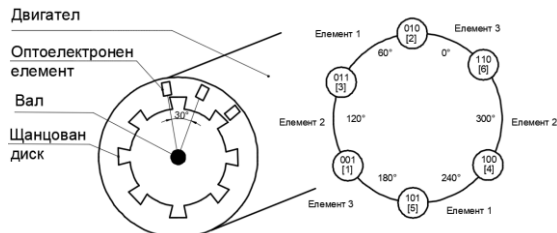
формира съответния управляващ сигнал. Изключително важно е да се определи точното положение на ротора.

Въртящият момент може да се управлява по два начина. Единият е чрез изменение на големината на фазовия ток посредством широчинно-импулсна модулация при константен ъгъл на задържане. Другият е чрез промяна на ъгъла на задържане, но този начин на управление води до увеличаване пулсациите на въртящия момент и по тази причина не се препоръчва. В (DiRenzo, 2000) се предлага управление на ПРД със сензорно управление чрез контролер TMS320F240.



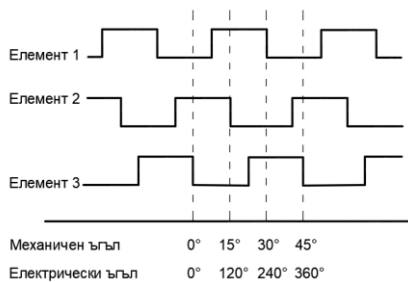
Фиг. 1. Структура на електрозадвижане с ПРД – сензорно управление

Примерно изпълнение на сензор, отчитащ ъгловата позиция на ротора, е показан на (фиг. 2.)



Фиг. 2. Позиционен сензор

Състои се от 3 оптични елемента, монтирани на 30° (механически) един от друг по обиколката на диска, т.е. на 240° (електрически), по този начин се създават изходни сигнали, показани на фиг.3. Получава се симетрична трифазна система, при която сигналът на третия оптичен елемент изостава на 120° от първия сигнал, а сигналът на втория оптичен елемент изостава на 240° от първия т.е. на 120° от сигнала на третия оптичен елемент.



Фиг. 3. Изходни сигнали на оптичните елементи

На всеки 7,5° механичен ъгъл се получава промяна в състоянието на един от трите изходни сигнала, а на всеки 45° цикълът се повтаря. На 45° механичен ъгъл отговарят 360° електрически ъгъл, съответно на 7,5° отговарят 60°. Съответствието между механичните и електрическите ъгли зависи от броя на зъбите или процепите на щанцования диск. На този диск те са 8 - затова ъгловата честота на електрическите сигнали е 8 пъти по-висока от механичната. Механичните ъгли са удобни за управление на скоростта, а електрическите за комутацията.

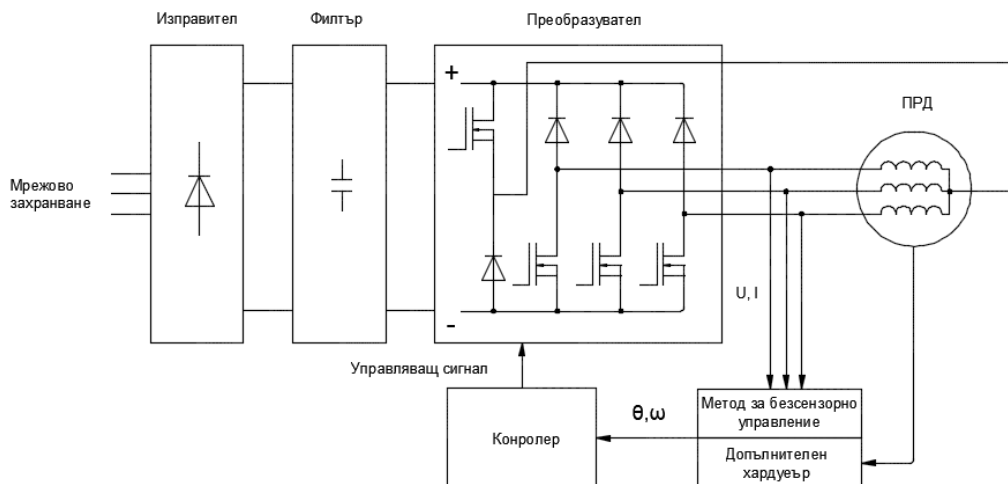
Основните недостатъци на сензорното управление са свързани със самия сензор за ъгловото положение на ротора на ПРД. Сензорът представлява измервателен преобразувател от механична към електрическа величина. Той изисква механичен монтаж - куплира се на вала на двигателя, а изходните му сигнални проводници се присъединяват към електрическото табло за управление. Проводниците трябва да са защитени не само от механични въздействия, но и от електромагнитни смущения, също така в промишлени условия, често се налага да бъдат защитени от химически агресивната среда. Освен това те не се полагат заедно със силовите проводници. Всичко това осъбява задвижането. Сензорът носи потенциален риск от повреда и ограничава регулирането на скоростта поради ограничението на разделителната способност на сензора.

Безсензорно управление

През последните години се наблюдава сериозен ръст на изследванията в така нареченото безсензорно управление (Gorbounov, Y., Chen, H. 2019). Структурна схема на електрозадвижане с безсензорно управление е показана на фиг.4. Както се вижда от фигурата, силовата

част на електрозадвижването с безсензорно управление е аналогична с тази на сензорното. Съществената разлика е

в определяне на позицията на ротора и като следствие на това системата на управление е с друга структура.



Фиг. 4. Структура на задвижване с ПРД – безсензорно управление

Примерна класификация на методите на безсензорно управление е показана на фиг. 5.



Фиг. 5. Класификация на методите на безсензорно управление

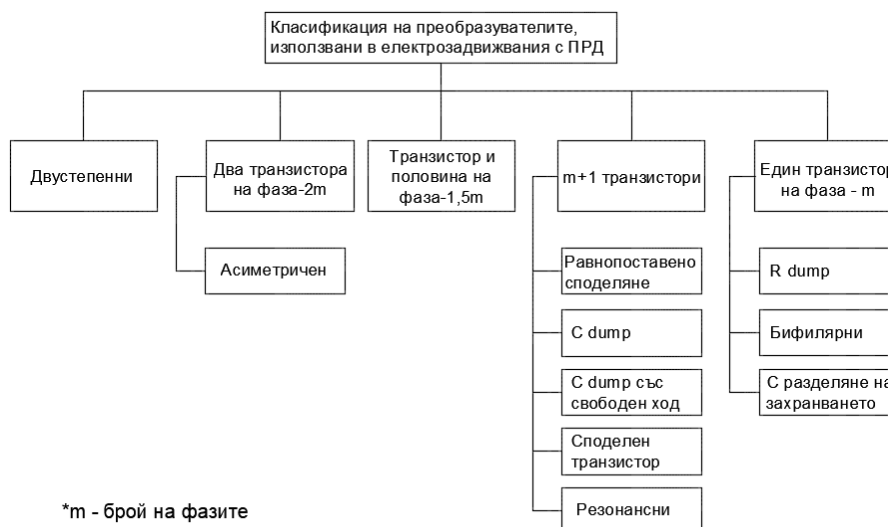
Преобразуватели, използвани в електрозадвижванията с ПРД

ПРД не могат да работят директно свързани към електрическото захранване, независимо дали то е постоянно токово или е от променливотоковата мрежа. В структурата на електрозадвижването с ПРД винаги се включва силов електронен преобразувател. Подробен

анализ на използваните преобразуватели и е направен в (Ahn, et. al, 2010, Mahmoud, et. al, 2013, Emadi, et. al, 2019). Изборът на силов електронен преобразувател в електрозадвижването с ПРД е от съществено значение. Съществуват някои специфични изисквания, с които трябва да се съобразява изборът:

- ✓ Преобразувателят трябва да има възможност да включва следващата фазна намотка на двигателя преди да е изключена предходната. Така е възможно да се прекрива включването на две съседни фазни намотки;
- ✓ За управление на фазовия ток е необходимо да се модулира напрежението с помощта на широчинно-импулсна модулация;
- ✓ Енергията на размагнитване трябва да се върне към източника или да се използва във следващата фаза;
- ✓ В някои приложения трябва да има резонансна верига, за да се приложи превключване с нулево напрежение или нулев ток;
- ✓ Желателно е използване на минимален брой полупроводникови елементи.

Класификацията на използваните преобразуватели в задвижванията с превключваеми реактивни двигатели е показана на фиг.6.



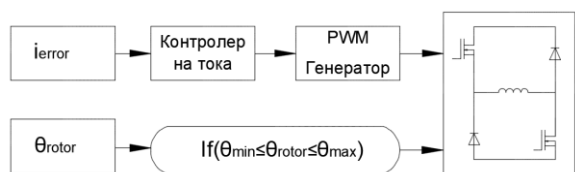
*m - брой на фазите

Фиг. 6. Класификация на преобразувателите

Преобразувателите за задвижвания с ПРД се захранват с постоянно напрежение, което най-често се получава от токоизправител, свързан с променливотоковата мрежа. Между изправителя и преобразувателя се свързва кондензатор, както е показано на фиг.1 и фиг.4. В практиката приложение са намерили пасивни и активни филтри. По-често се използват пасивни филтри поради тяхната надеждност и по-малкото елементи, които ги изграждат. Например, когато се използва само кондензатор, който е свързан към положителната и отрицателната шина на постоянното напрежение (фиг. 9,10,11a). В някои случаи е целесъобразно да се използват пасивни филтри с кондензатор и диод (фиг. 11б). Активните филтри се подразделят на такива с отделно захранване или свързани към основното захранване.

Най-използваните преобразуватели в електрозадвижванията с ПРД са:

✓ **Асиметричен мостов преобразувател** (фиг. 9) - позволява независим контрол на токовете във фазите, следователно поддържа добър контрол на въртящия момент. Като недостатък може да се отбележи наличието на голям брой полупроводникови елементи. При използването на един сигнал за управление на двата транзистора в едната фаза на асиметричния мостов преобразувател е възможно съответната фазна намотка на двигателя да попада само към две стойности на напрежението, положително напрежение от захранващата постояннотокова шина (+U_{dc}) или същото напрежение, но отрицателно, т.е. подадено в обратна посока (-U_{dc}). Подаване на положително напрежение съответства на случая когато двата транзистора са в проводящо състояние, а подаване на отрицателно напрежение съответства на случая, когато диодите на асиметричния мостов преобразувател са в проводящо състояние. Недостатък на този начин на управление е, че не се използват пълните възможности на преобразувателя. Когато към асиметричния мостов преобразувател се подават два сигнала за управление е възможно на изходните клеми да се формира напрежение с три нива, +U_{dc}, 0 или -U_{dc}. На фиг. 7 е представено управление на транзисторите с два сигнала. Първият е резултат от контролера на тока, а вторият за управление при определена позиция на ротора.



Фиг. 7. Управление на асиметричен преобразувател с два сигнала.

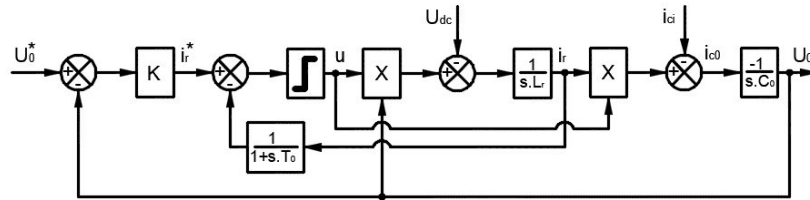
✓ **m+1 преобразувател** (фиг. 10) - при електрозадвижванията с ПРД фазовата намотка не провежда ток по време на целия цикъл, следователно някои от полупроводниковите елементи може да се споделят между различни фазови намотки. В този преобразувател трите фази на ПРД са свързани към четири електронни ключа. Намалването на броя на силовите транзистори в сравнение с асиметричния преобразувател е постигнато чрез споделяне на

транзистор между две фазови намотки. Когато ПРД работи с ниска скорост фазовият ток може да намалее бързо поради индуцираното напрежение, следователно не се получава припокриване между различни фазови токове и токът на всяка фаза може да се контролира независимо, но при високи скорости не е така. Получава се зона на припокриване и комутацията на втората фаза ще се забави по време спрямо първата, следователно се губи възможността за независимо управление на фазите и в това се изразява недостатъкът на този преобразувател. Например, когато се изисква фаза А да бъде изключена, Т1 и Т2 трябва да бъдат изключени и така фазовият ток ще намалее до 0 като тече през диодите D1 и D2. Ако фазата В трябва да бъде възбудена преди токът на фаза А да спадне до 0 Т2 и Т3 трябва да бъдат включени, следователно има противоречие относно състоянието на Т2. При работа с висока скорост, по време на комутацията от фаза А към фаза В е възможно да се получи припокриване на токовете. За да се избегне това, ъгълът на проводимост на фаза В трябва да се забави във времето. Забавянето на ъгъла на проводимост на поредната фаза води до намаляване на въртящия момент.

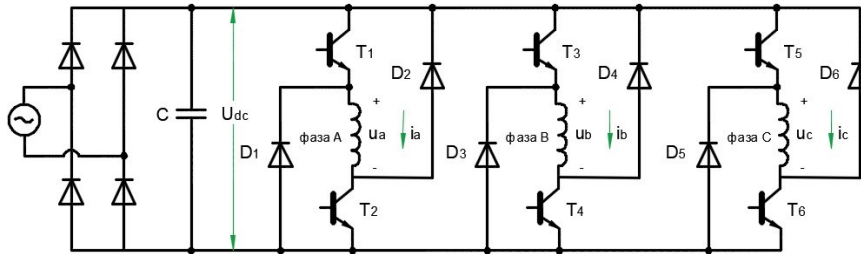
C dump преобразувател (фиг. 11a) чрез преобразувателя, изпълнен по показаната схема, се осигурява независимо управление на двете фази. Схемата осигурява по-високо напрежение на размагнитване по време на комутация, което води до по-високи стойности на напрежението на захранващите устройства. При тази схема не е възможно получаването на нулево напрежение във веригата, поради което се елиминира допълнителна степен на свобода при управлението на тока, което води до увеличаване на акустичния шум. Освен това, фазовата намотка е или под постоянното напрежение на захранването, или на напрежението между кондензатора С1. Това обстоятелство не само съкращава живота на изолацията на проводниците, но също е източник на допълнителни загуби. Тези недостатъци се елиминират с поставяне на транзистор Тf и схемата добива вида, показан на фиг. 11б.

Управление на напрежението върху кондензатора С1

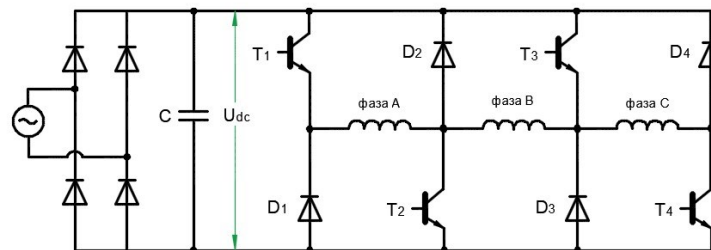
Основните проблеми са: колебанието на напрежението във веригата на кондензатора С0 и пулсациите на тока i_r , който протича през бобината L_r. За намаляване на разликата между върховия и средния ток се избира по-голяма стойност на L_r. Тези проблеми се решават чрез използване на обратни връзки по ток и напрежение в системата на управление. Вътрешният контур е за управление на тока i_r , а външният – за управление на напрежението на кондензатора. В обратната връзка на тока е въведен филтър от първи ред – токът се връща с времева константа T₀. На фиг. 8 е показано как се реализира управлението върху кондензатора С1. Сигналът μ е свързан с превключването на транзистора Т_r ($\mu=1$, Т_r→включен; $\mu=0$, Т_r→изключен). Всеки път когато Т_r е включен протича ток през L_r, което се дължи на разликата между U₀ и U_{dc}. Разликата между входящия ток и тока i_r е токът през кондензаторът С1, който определя неговото напрежение U₀.



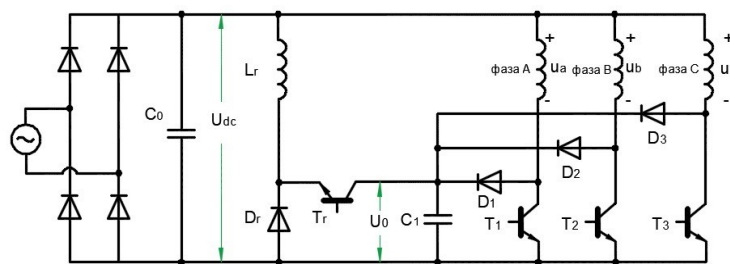
Фиг.8. Управление на напрежението върху кондензатора C1



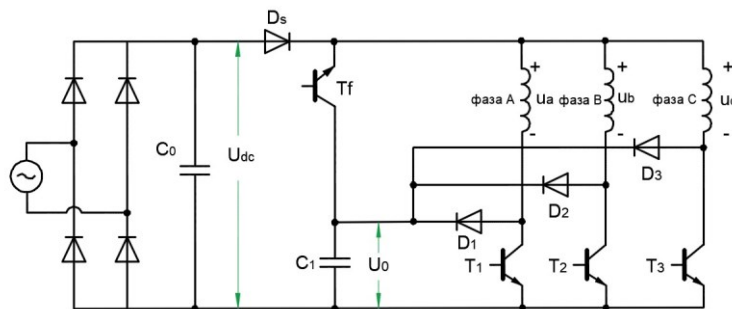
Фиг. 9. Асиметричен мостов преобразувател



Фиг. 10. m+1 преобразувател



Фиг. 11а. C-dump преобразувател

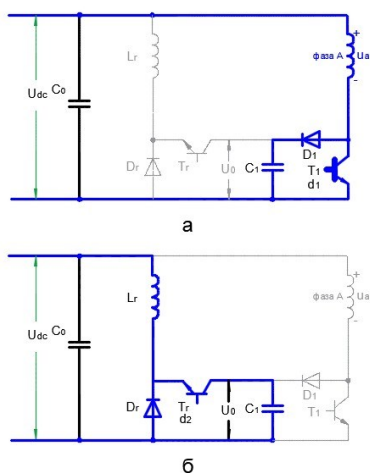


Фиг. 11б. C-dump преобразувател с транзистор за свободен ход.

Състояния при работата на C-dump преобразувател

За анализиране на начина на работа е достатъчно да се разглежда само една фаза, в случая фаза А. Съставна част на C-dump преобразувателя е веригата, в която участват следните елементи: захранването на постояннотоковата шина със своето напрежение U_{dc} , същото е върху кондензатора C_0 , индуктивността на

фазната намотка на фаза А, транзисторът T_1 , диодът D_1 и кондензаторът C_1 . По схемата на свързване и начина на работа елементите съставят, от една страна схема на повишаващ преобразувател (фиг. 12а), а от друга страна кондензаторът C_1 , транзисторът T_r , диодът D_r , бобината L_r и захранването с кондензатора C_0 - схема на понижаващ преобразувател (фиг. 12б).

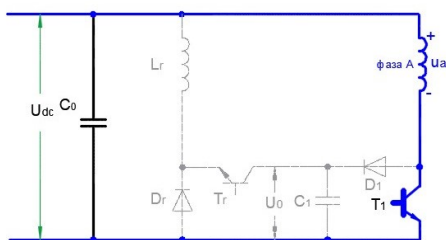


Фиг. 12. а – повишаващ преобразувател, б – понижаващ преобразувател

Транзисторът T1 се използва за управление на фазовия ток, а Tr за управление на напрежението на кондензаторът C1. Когато токът във фаза A е под задания, транзисторът T1 се включва и към намотката се прилага напрежението Udc. Когато токът във фазата надвиши задания, T1 се изключва и върху намотката се прилага разликата между напреженията на постояннотоковата шина (Udc) и напрежението (U0), което е върху кондензатора C1. Например, когато токът във фаза A е под задания и Tr е включен, фаза A работи в състояние 2. Когато токът трябва да протече във фаза B, T2 е включен, а T1 е изключен. Токът във фаза B протича през C0 и T2, а токът във фаза A – D1, C0 и C1. По този начин се осигурява независимо управление на двете фази. Транзисторът Tr се използва за управление на U0 за осигуряване на по-високо напрежение на размагнитване по време на комутация, което води до по-високи стойности на захранващото напрежение. Това е преобразувател с твърда комутация, защото транзисторите и диодите се включват и изключват, докато техните напрежения и токове са различни от нула.

Състояние на схемата 1: T1- включен, Tr – изключен

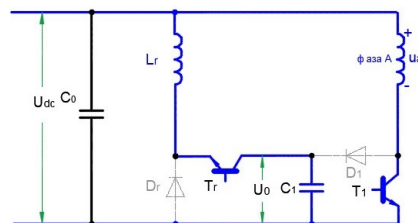
Схемата на електрическата верига при състояние 1 е показана на фиг.13. При това състояние е включен транзистор T1, като в същото време транзисторът Tr е изключен. T1 подава захранващото напрежение към намотката на фаза A. Трябва да се отбележи, че T1 се включва многократно по време на формирането на токовия импулс през фазата. При първото му включване в рамките на времетраенето на действието на фаза A, токът в намотката започва да расте от нула, а при следващите включвания началният ток вече има някаква стойност, която е в зависимост от необходимостта фазата да създава определен електромагнитен момент на двигателя.



Фиг. 13. Състояние 1

Състояние 2: T1- включен, Tr – включен

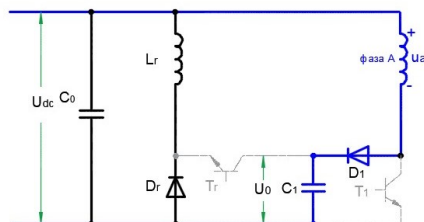
Схемата на електрическата верига при състояние 2 е показана на фиг.14. Когато се включи транзисторът Tr, който работи в схема на понижаващ импулсен преобразувател, започва прехвърляне на енергията от кондензатора C1 към бобината Lr и към кондензатора C0, свързан към захранващия източник. Може да се каже, че се връща енергия обратно към захранването. В същото време транзисторът T1 продължава да е включен както в състояние 1 и токът през фазовата намотка продължава да расте, като по този начин се повишава запасената магнитна енергия в двигателя.



Фиг. 14. Състояние 2

Състояние 3: T1- изключен, Tr – изключен

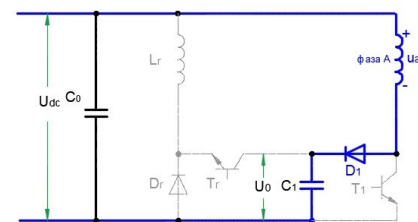
Схемата на електрическата верига при състояние 3 е показана на фиг.15. В това състояние двата транзистора са изключени. В схемата на преобразувателя се образуват два токови контура. В състава на единия влизат фазната намотка със своята индуктивност L, диодът D1 и кондензаторът C1. Част от запасената магнитна енергия зарежда кондензатора C1. В другия контур участват индуктивността Lr, диодът Dr и захранването с кондензатора C0. Прехвърля се енергия от индуктивността Lr към захранването. Така и в това състояние продължава да се връща енергия обратно към захранването. Това е процес, който е започнал в състояние 2.



Фиг. 15. Състояние 3

Състояние 4: Комутация на фазовия ток

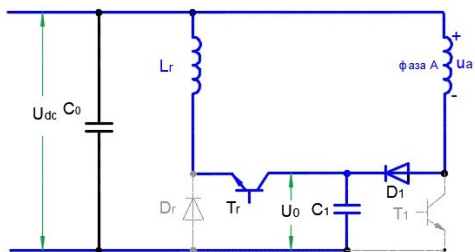
Схемата на електрическата верига при състояние 4 е показана на фиг.16. В това състояние се прави комутация на фазовия ток. Той трябва бързо да се намали до нула. През това време транзисторът T1 е изключен и енергията на двигателя се прехвърля към кондензатора C1. По време на това състояние напрежението върху кондензатора C1 се увеличава. Токът намалява тъй като напрежението на двигателя е разликата от захранващото напрежение и това на кондензатора C1.



Фиг. 16. Състояние 4

Състояние 5: T1- изключен, Tг – включен

Схемата на електрическата верига при състояние 5 е показана на фиг.17. Това състояние е необходимо когато токът във фазата се управлява чрез изключване на транзистор T1. Фазната намотка на двигателя е свързана във верига както в състояние 4. В същото време транзистор Tг е включен прехвърляйки енергия от C1 към бобината Lг и захранването както в състояние 2.



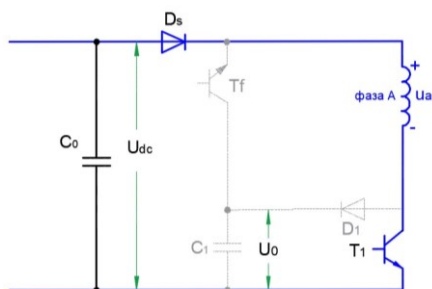
Фиг. 17. Състояние 5

C-dump преобразувател с транзистор за свободен ход

На фиг. 11б от една страна е въведен транзистор Tf, който служи за зареждане на кондензатора C1, а от друга е премахната индуктивността Lг.

Състояние 1: T1- включен, Tf – изключен

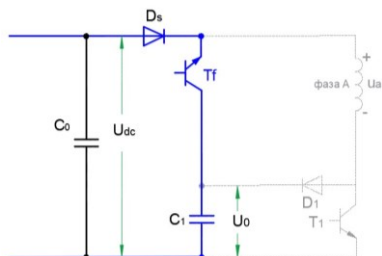
Схемата на електрическата верига при състояние 1 е показана на фиг.18. (за фаза A), когато транзисторът T1 е включен.



Фиг. 18. Състояние 1

Състояние 2: T1- изключен, Tf – включен

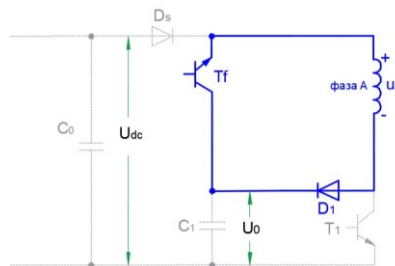
Схемата на електрическата верига при състояние 2 е показана на фиг.19. Когато токът надвиши зададена стойност се изключва T1 и се включва Tf. Тогава започва зареждане на кондензатора C1.



Фиг. 19. Състояние 2

Състояние 3: Tf- включен, D1 – включен

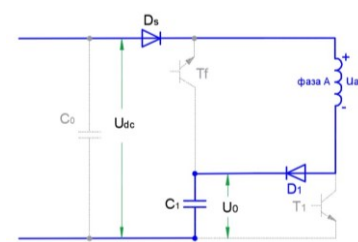
Схемата на електрическата верига при състояние 3 е показана на фиг. 20. Напрежението на кондензатора надвишава захранващото и чрез Tf и D1 се захранва фаза A (напрежението във фазата на двигателя е почти нула).



Фиг. 20. Състояние 3

Състояние 4: Tf- изключен, D1 – включен

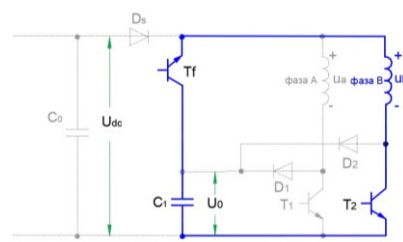
Схемата на електрическата верига при състояние 4 е показана на фиг.21. Когато се комутира токът във фазата T1 се изключва без да се включва Tf, което позволява частично прехвърляне на енергията от ПРД към C1 и частично за преобразуване на енергия в машината. По време на това състояние напрежението във фазата на машината е Udc-U0.



Фиг. 21. Състояние 4

Състояние 5: Tf- включен, D1 – изключен

Схемата на електрическата верига при състояние 5 е показана на фиг. 22. Когато фаза A е напълно комутирана, енергията в C1 може да бъде използвана като се насочи към фаза B или C чрез включване на Tf. Диодът Ds е запущен, което позволява напрежението U0 да бъде приложено върху проводящата фаза за по-бързо нарастване на тока.



Фиг. 22. Състояние 5

По време на всички тези състояния се постига независимо управление на фазите с достатъчна гъвкавост за по-добра динамика на задвижващата система.

Предимствата на преобразувателя са:

- ✓ Пулсациите в тока са по-малки, защото няма трансфер на енергия от машината към източника на постоянен ток;
- ✓ Постига се положително, нулево и отрицателно напрежение върху фазните намотки с положителен ефект от по-висока гъвкавост на управлението, по-нисък акустичен шум, по-ниски диелектрични загуби в машината и по-дълъг живот на изолацията;
- ✓ По-високото напрежение на C1 се използва за по-добро управление на тока и въртящия момент, особено при по-високи скорости, където напрежението от източника е недостатъчно за ефективно динамично и стабилно управление.

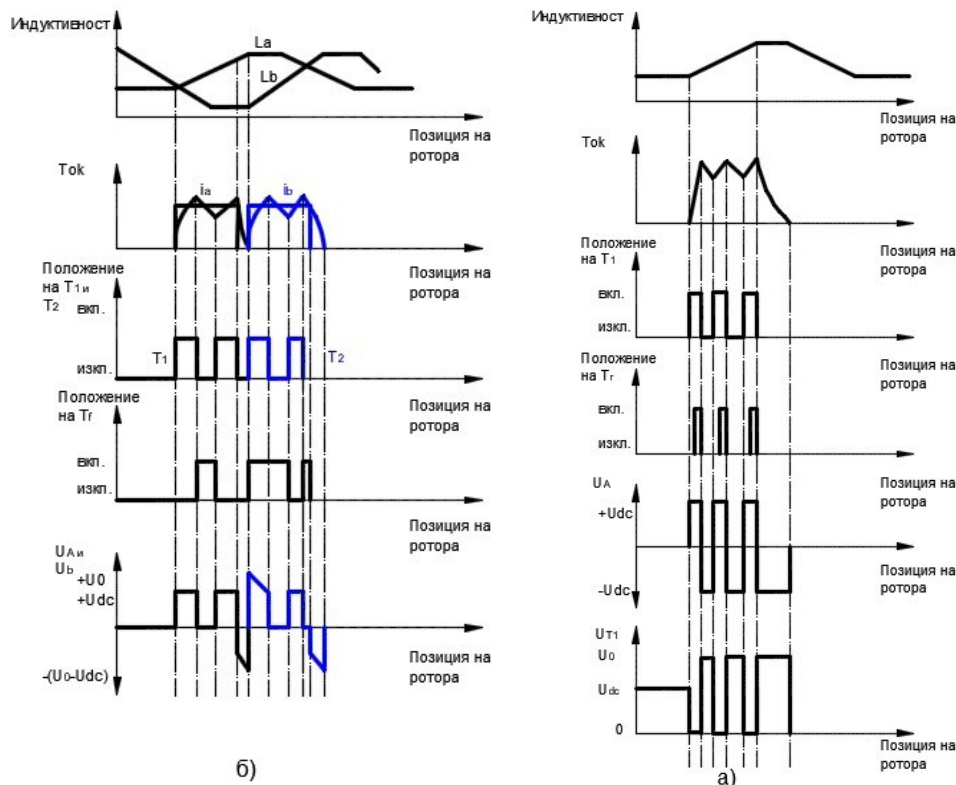
Недостатъците на преобразувателя са:

- ✓ Възможна е само работа в двигателен режим;
- ✓ Стойността на T_f е много по-голяма от стойността на другите транзистори.

Координацията на управлението между превключвателя за свободен ход и главните фазови превключватели по време на комутация с припокриващи се фазови токове ограничава гъвкавостта и свободата на

управление. Това би довело до по-дълго време за комутация с възможна регенерация и увеличаване на акустичния шум.

На Фигура 23 са показани формите на индуктивността, тока, управляващите сигнали и напрежението на преобразувателите от фиг. 11 – а и б.



Фиг. 23. Управление на преобразувателите от фигура 11.

Заклучение

В заключение на изложеното до тук може да се отбележи, че за ефективно и функционално електрозадвижане, изборът на преобразувател и метод на управление е от съществено значение. Анализът на структурите на електрозадвижания с ПРД, показва предимствата на безсензорното управление в минната индустрия, където изискванията по отношение на надеждност и ниска енергоемкост са на преден план. Системите с безсензорно управление чрез усъвършенстване могат да отговорят на изискванията за устойчивост и точност. Установени са предимствата и недостатъците на най-често използваните преобразуватели с оглед използването им в електрозадвижане с широк диапазон на скоростта.

Литература

Ahn, J., Liang, J., Lee, D. (2010). Classification and Analysis of Switched Reluctance Converters, *Journal of Electrical*

Engineering & Technology Vol. 5, No. 4, pp. 571~579, 2010

DiRenzo, M. (2000). *Switched Reluctance Motor Control – Basic Operation and Example Using the TMS320F240.* : Application Report, 2000.

Emadi, A., Jiang, J. Bilgin, B. (2019). *Switched Reluctance Motor Drives Fundamentals to Applications.* Boca Raton : Taylor & Francis Group, 2019. стр. 825.

Gorbounov, Y., Chen, H. (2019). Technological aspects and applications of large power switched reluctance motors in mining, *Journal of Mining and Geological Sciences, University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski",* Vol. 62, pp.86-91, ISSN 2738-8816, 03 Nov.2019.

Krishnan, R. (2001). *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications.* CRC Press, 2001.

Mahmoud, S., Sherif, M., Aliem, E. (2013). Studying Different Types of Power Converters Fed Switched Reluctance Motor. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering* Vol. 1, No. 4, December, 2013

Miller, T. (2001). *Electronic control of switched reluctance machines.* Newnes, Reed Educational and Professional Publishing Ltd