

©Journal of the Technical University Sofia, branch at Plovdiv
“Fundamental Sciences and Applications”, Vol. 14, 2009
International Conference Engineering, Technologies and Systems
TechSys '2009
BULGARIA

LINE REGENERATION MODELING OF FREQUENCY CONTROLLED INDUCTION DRIVES

IVAN KOSTOV KRUM KUTRYANSKI VLADIMIR SUVARIEV

Abstract. The standard frequency controlled induction motor drives utilize a diode rectifier bridge to supply AC power from the utility to the DC link. Because the rectifier is the most cost-effective solution, it does not permit reversing the power flow. This obstructs operating the motor in the regenerative braking mode for active deceleration. In this paper are classified some methods of electrical braking of induction motor frequency controlled drives. A model for line regeneration braking of these drives is presented. It enables regenerative braking operation, time-independent from induction motor deceleration modes. The model is applicable for the purposes of research and training. The effectiveness of the study was confirmed by simulation.

Key words: Induction Motor, Electrical Braking, Line Regeneration, Frequency Controlled Drives.

МОДЕЛИРАНЕ НА РЕГЕНЕРАТИВНО СПИРАНЕ В АСИНХРОННИ ЧЕСТОТНИ ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНИЯ

1. Въведение

Поради простотата в устройството, голямата надеждност, сравнително ниските цени, по-лесното обслужване, монтаж и ремонт, асинхронните двигатели (АД) имат широко разпространение в индустрията и за тях са проектирани схеми за спиране, базирани на основните видове спирачни режими [1,3]. Със задълбочаването на енергийната криза актуалността и значението на спирачните режими нарастват, а с развитието на теорията и практиката на електрозадвижването възможностите за реализации на високоефективни спирачни режими непрекъснато се увеличават [7,8].

В зависимост от физичната природа спиранията се разделят на: механично спиране чрез механични спирачки [5] и електрическо спиране [6]. Поради ред недостатъци като бързо износване, невъзможност за регулиране времената на спиране, висока цена, продиктувана от нуждата от допълнително устройство (спирачки и хващащи механизми), сложно монтиране и поддръжка, механичните спирачки играят второстепенна роля и се използват по-рядко в индустрията. Електрическото спиране притежава редица предимства, които се изразяват в малки времена на спиране, плавност и точност, по-голяма ефективност [7]. При електрическото спиране спирачният момент има електромагнитен характер и се създава на вала на двигателя от

самия двигател и не изисква специално спирачно механично устройство. АД се използва за забавяне на работния механизъм като създава спирачен момент, действащ в обратна посока на външния съпротивителен момент. Постъпващата на вала мощност се преобразува от двигателя и се разсейва в устройствата за електрическо спиране, като една част (понякога твърде голяма) задължително се разсейва в двигателя във вид на топлина [2,4]. Особено добри възможности за реализация на различни видове електрическо спиране притежават електрозадвижванията с преобразуватели на честота (ПЧ).

2. Класификация на методите за електрическо спиране

Електрическото спиране на честотни електрозадвижвания най-често се осъществява чрез генераторни режими на работа. Електрическо спиране с противовключване рядко се използва в чистия му вид.

Когато асинхронният двигател работи в генераторен режим, той преобразува енергията на движещите се части от работната машина в електрическа. В този случай асинхронният двигател, въпреки че е източник на електрическа енергия, трябва да бъде свързан към захранващата мрежа, от която се консумира реактивна енергия, за да поддържа магнитното си поле. Понастоящем не съществува утвърдена класификация на методите за електрическо спиране в честотни електрозадвижвания. В този раздел на статията авторите предлагат такава.

Видовете електрическо спиране на честотни електрозадвижвания могат да бъдат класифицирани на два големи класа в зависимост от това дали енергията, която постъпва на вала на двигателя се превръща изцяло в топлина, или (частично) се оползотворява:

- **генераторно спиране.** То се реализира в една от следните две форми – динамично спиране и динамично спиране с възбуждане от постоянен ток (с инжекция на постоянен ток в статора);

- **регенеративно спиране.** Включва спиране с повишено хлъзгане и спиране с отдаване на енергия в мрежата. В теорията се използва терминът “рекуперация”.

Най-добри качествени показатели притежава спирането с отдаване на енергия в мрежата, но и цената на реализацията му е твърде голяма.

2.1. Генераторно спиране

Това е метод за спиране, при който двигателят работи в генераторен режим. Роторът се върти с приведена механична скорост $\omega_r = Z_p \omega_m$, по-голяма от скоростта на въртене на пространствения вектор на статорното напрежение ω_s . Този метод се реализира чрез външен резистор с активно съпротивление или чрез импеданса на накъсосъединения ротор.

• **динамично спиране.** За реализацията на метода са необходими допълнителни транзистор и резистор в междинното звено за постоянен ток (МЗПТ). Кинетичната енергия на ротора се разсейва във вид на топлина в резистора. Обикновено методът е вграден в инвертора, но оскъпява ПЧ с около 25% и не може да се използва за голяма относителна продължителност на работа (ОПР), поради голямото количество топлина, което се отделя в резистора за динамично спиране. За избягване на този проблем се използват модули за динамично спиране, които са външни за стандартните честотни инвертори и могат да обслужват големи ОПР. До около 20kW транзисторът за динамично спиране е вграден в инвертора, само резисторът е външен за случаите на големи ОПР или повишен брой включвания в час. Над тази мощност и транзисторът, и резисторът са външни модули за инвертора. Наличието и работата на модул за динамично спиране действа благоприятно върху дълготрайността на кондензаторите, защото модулът не позволява да се повиши напрежението върху кондензаторите на МЗПТ. Хлъзгането при този метод е отрицателно, машината работи като трифазен

асинхронен генератор върху капацитивен товар през моста за реактивна енергия на инвертора и развива голям спирачен момент M_{br} .

- **динамично спиране с възбуждане от постоянен ток.** Честотните инвертори позволяват статорните намотки на двигателя да се запазват с постоянно напрежение. По този начин се реализира класически метод на динамично спиране. Управлението на процеса се състои главно в задаване на продължителността на спирачния процес и на големината на постоянния ток, който възбужда постоянния магнитен поток. Характерни за метода са: слаба зависимост на M_{br} от големината на тока на инжекция при високите скорости, голям спирачен момент в областта на ниските скорости, липса на спирачен момент при неподвижен двигател и необходимост от външен запазващ източник на постоянен ток. Този източник, ако се използва неуправляемият изправител на ПЧ, трябва да притежава свойства на регулируем източник на ток. Кинетичната енергия на двигателя се разсейва в ротора във вид на топлина и може да има много по-големи от номиналния режим стойности. Предимства на метода са, че е вграден в инвертора и не формира допълнителни разходи към цената му. Недостатъците са повече – малък M_{br} , големи спирачни времена t_{br} и малки ОНР заради големите загуби в ротора. Съществена особеност на метода е, че токът в статора практически не зависи от скоростта на двигателя.

2.2. Регенеративно спиране

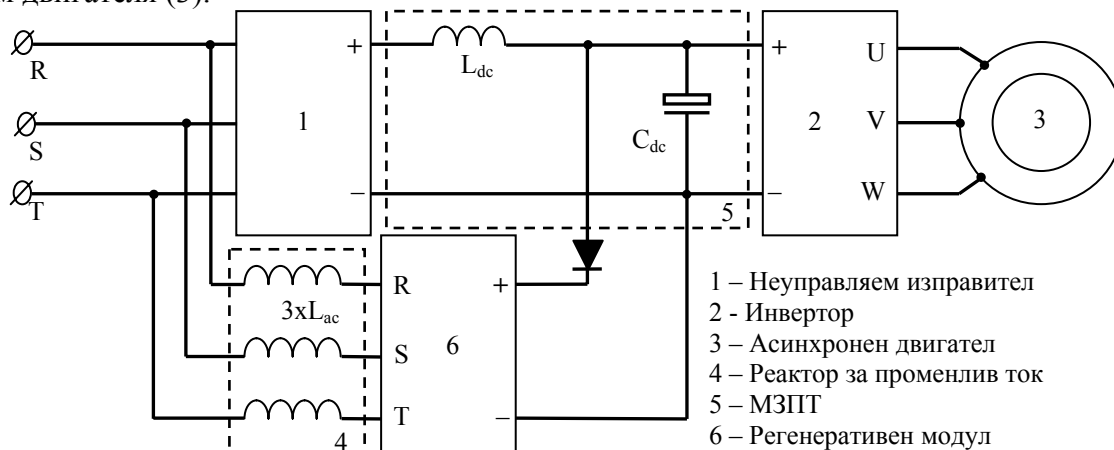
При този метод роторът също се върти с приведена механична скорост, по-голяма от скоростта на въртене на пространствения вектор на статорното напрежение ω_s . Реализира се в две форми – спиране с повишено хлъзгане (чрез капацитивния товар на МЗПТ) или чрез връщане на енергия в запазващата мрежа. И в двата случая генерираната енергия се оползотворява т.е. предаването на енергия е двупосочно.

- **спиране с повишено хлъзгане.** Когато при въртящ се двигател се намали изходната честота на инвертора (увеличи се хлъзгането), машината преминава в генераторен режим, развива спирачен момент и отдава енергия в запазващия източник. В случая това е кондензаторът на МЗПТ. Когато стъпката на намаляване на изходната честота е подходящо избрана, двигателят може да развие много големи спирачни моменти, в някои случаи може да се реализира спиране с противовключване.. Най-често методът се използва за реализация на спиране до нулева скорост. Предимствата му са, че е вграден в ПЧ, може да развива по-големи спирачни моменти и по-малки времена на спиране в сравнение с метода динамично спиране с инжекция на постоянен ток. Недостатъците са, че ограничава ОНР, притежава по-сложна настройка в сравнение с инжекцията на постоянен ток и, че се използва само за окончателно спиране. Генерираната от двигателя енергия се съхранява в кондензаторите на звеното за постоянен ток и се консумира при необходимост от двигателя.

- **спиране с отдаване на енергия в мрежата.** При този метод мощността, която се генерира от машината се връща в запазващата мрежа с помощта на управляем изправител от тиристорен или транзисторен тип, най-често изпълнен по мостова схема. За да се връща енергия в мрежата е необходимо в генераторен режим едновременно да работят две устройства – управляем изправител в инверторен режим (транзисторен или тиристорен) и ограничителен реактор за връщания в мрежата ток. Регенеративният метод се реализира или с отделен модул за връщане на енергия, или входният модул на ПЧ съвместява двете функции. Цената на модула може да достигне 50% от цената на основната конфигурация. Този метод на спиране е най-модерен и съвременен. В такъв режим цялата генерирана мощност от машината се оползотворява като се връща в запазващата мрежа. Методът не ограничава ОНР, може да се използва и при повишен брой включения в час.

3. Модел на ЕЗ за спиране с отдаване на енергия в мрежата

Препоръчителното използване на диоден изправителен мост поради ниската му цена води до невъзможност да се регенерира постъпващата от машината и механизма енергия. На фиг.1 е показано модулно схемно решение за реализация на регенеративно спиране. В двигателен режим ПЧ работи по обичайния начин, енергията се предава от захранващия източник, през неуправляемия изправител (1), МЗПТ (5) и инвертора (2) към двигателя (3).

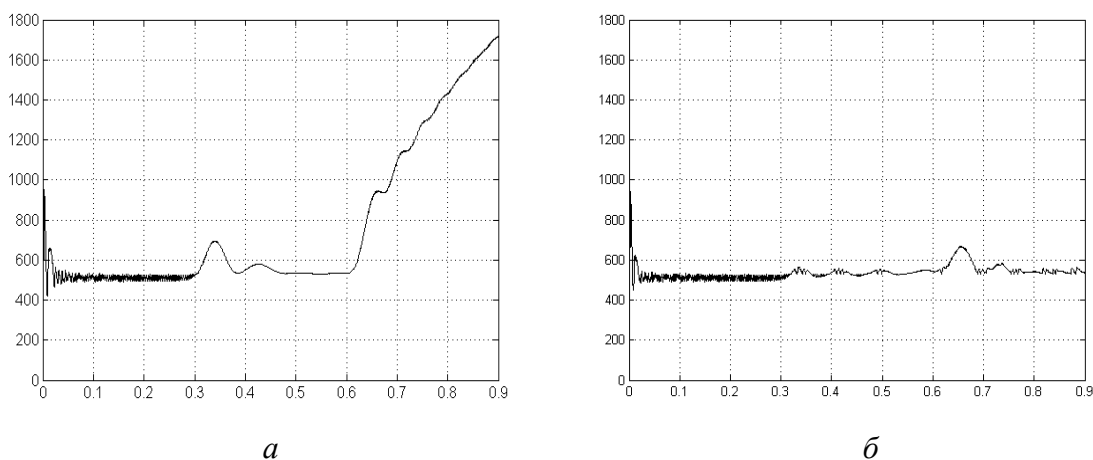


Фиг.1. Схема на свързване на регенеративен модул.

Повишаването на напрежението на МЗПТ в генераторен режим на машината активира трифазния регенеративен модул (6), който през реактора за променлив ток (4) започва да връща енергия в мрежата. Работата на модула е синхронизирана с честотата на захранващата мрежа, модулът притежава регулатори на ток, чието задание се определя от големината на натоварването. На основата на схемата от фиг.1 е разработен симулационен модел на ЕЗ с възможност за регенериране на постъпващата от задвижвания механизъм енергия.

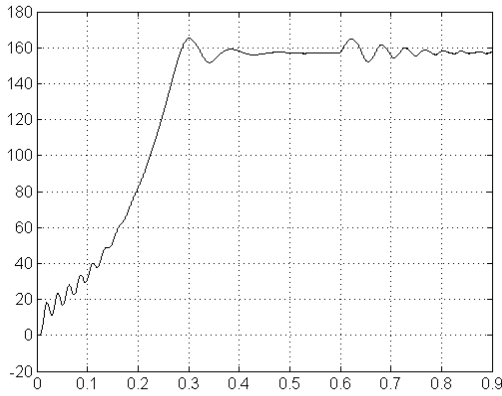
4. Резултати

На фиг.2 е показано изменението на напрежението на МЗПТ при изключен и включен модул за регенериране на енергията, а на фиг.3 и фиг.4 - съответните преходни процеси на ъгловата скорост и електромагнитния момент на машината. Параметрите на двигателя, ПЧ, регенеративния модул и дименсиите на изображените величини са дадени в Приложение.

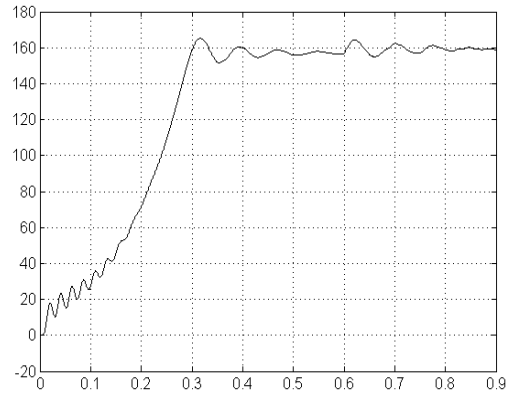


Фиг.2. Напрежение на МЗПТ на ПЧ при работа на задвижването в двигателен и генераторен режим: (а) без да връща енергия в мрежата; (б) с връщане на енергия.

$$M_{br} = -200 \text{ Nm}; I_s = 100 \text{ A}; f_s = 50 \text{ Hz}; t_{br} = 0.6 \text{ s}.$$

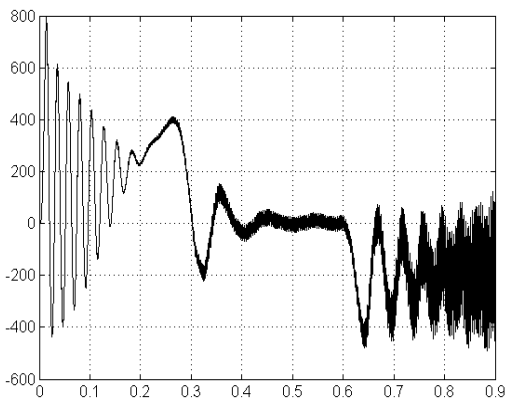


a

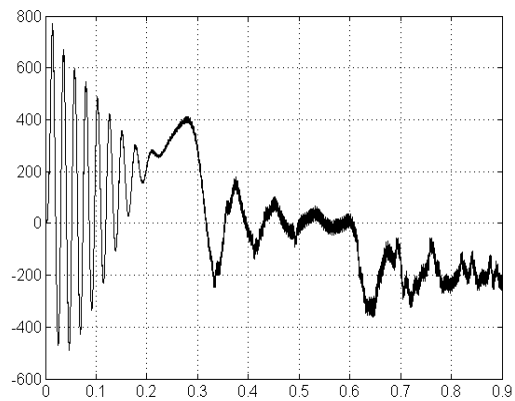


б

Фиг.3. Преходен процес на ъгловата скорост на АД в двигателен и генераторен режим: (а) без да връща енергия в мрежата; (б) с връщане на енергия в мрежата.
 $M_{br}=-200Nm$; $I_s=100A$; $f_s=50Hz$; $t_{br}=0.6s$.

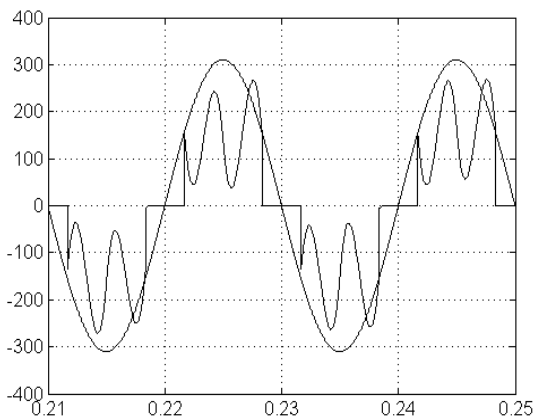


a

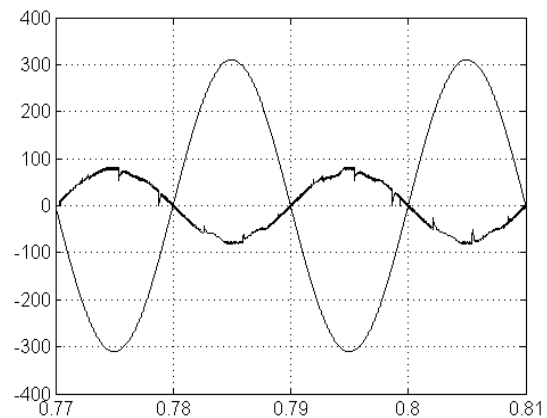


б

Фиг.4. Преходни процеси на електромагнитния момент на АД: (а) без да връща енергия в мрежата; (б) с връщане на енергия в мрежата.
 $M_{br}=-200Nm$; $I_l=100A$; $f_s=50Hz$; $t_{br}=0.6s$.



a



б

Фиг.5. Напрежение и ток на захранващата мрежа при пускане на честотно електрозадвигване на празен ход (а) и при връщане на енергия в мрежата (б).
 $M_{br}=-200Nm$; $I_l=100A$; $f_s=50Hz$; $t_{br}=0.6s$.

На фиг.5 са показани консумираният и върнатият в захранващата мрежа ток I_l по време на пусковия процес и в генераторен режим на симулираното задвижване.

5. Заключение

Предложена е класификация на методи за генераторно спиране в честотни асинхронни електрозадвижвания в зависимост от начина на преобразуване на генерираната от машината мощност.

Разработен е модел на обектното електрозадвижване и е показана възможност за рекуперация на постъпващата от задвижвания механизъм енергия. Работоспособността на модела е доказана чрез управлението на напрежението на МЗПТ и на върнатия ток в мрежата. Моделът може да се използва за анализ и на спирачни режими с повишено хлъзгане.

Интерес представлява разработването на методика за проектиране на реакторите, на системи за управление на фактора на мощността на електрозадвижването в генераторен режим и на мощността в рекуперативен режим.

Представеният спирачен метод е подходящ за използване в машини с двойно захранване и в механизми с големи електромеханични времеконстанти, работещи в повторно-кратковременни режими с повишен брой на включения в час.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Krishnan R.**, Electric Motor Drives, Modeling, Analysis and Control, Pearson Education, 2003.
2. **Jiang J., J. Holtz**, An Efficient Braking Method for Controlled AC Drives with a Diode Rectifier Front End, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 37, № 5 Sept./Oct. 2001 pp. 1299-1307.
3. **Михов М.**, Управление на електромеханични системи, в две части, МП Издателство на Технически университет – София, 2007.
4. **Galli D., S. Melly**, Filter solutions for the regeneration of electrical power, Schaffner EMV AG, Application Note, 2002.
5. **SEW Eurodrive**, Проектирование приводов, 2001.
6. **Allen – Bradley Publication**, AC Breaking Basics, 2001.
7. **Allen – Bradley Publication**, Regenerative Load Solutions, 2001.
8. **Техническое описание и инструкция по эксплуатации**, Рекуперативные блоки серии ЭПВ-Р, 2007.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Номинални данни на асинхронния двигател:

$P_N=37\text{kW}$; $U_N=380\text{V}$; $f_{sn}=50\text{Hz}$; $n_N=1480\text{r/min}$; $I_{sN}=95.7\text{A}$; $z_p=2$; $M_N=238.85\text{Nm}$;
 $L_s=0.000724\text{H}$; $R_s=0.08233\Omega$; $L_r=0.000724\text{H}$; $R_r=0.0503\Omega$; $L_m=0.02711\text{H}$; $J_d=0.37\text{kgm}^2$.

Данни на използвания ПЧ:

$L_{dc}=200\mu\text{H}$, $C_{dc}=5000\mu\text{F}$, $L_{ac}=1\text{mH}$, $I_l=100\text{A}$.

Дименсии:

$U_{dc} = [\text{V}]$; $\omega = [\text{rad/s}]$; $M = [\text{Nm}]$; $t = [\text{s}]$.

Department of Control Systems
Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
25 Tsanko Dyustabanov St.
4000 Plovdiv
BULGARIA

E-mail: ijk@tu-plovdiv.bg, kkutryanski@tu-plovdiv.bg, suvariev_1986@abv.bg