

РЕКУПЕРАТИВНО СПИРАНЕ В СОФИЙСКИЯ МЕТРОПОЛИТЕН

Тодор Йонов
todyon@tu-sofia.bg

**ТУ “София”, ЕФ, кат. ЕЕЕ,
бул.Кл. Охридски №8, София 1000,
БЪЛГАРИЯ**

Ключови думи: метрополитен, рекулперация, изправители

Резюме: В статията е направен анализ на приложението на режима на рекулперативно спиране в Софийския метрополитен. Анализирано е, защо в момента този режим е с много малка ефективност, въпреки възможностите на новите мотриси тип 81-740/741 да спират с връщане на енергия в мрежата. Направени са препоръки за приложение на такова спиране.

Въведение

В Софийският метрополитен, при пускането на втората отсечка (Център - Младост) на Първи метродиаметър, бяха въведени в експлоатация нови мотриси 81-740/741. Тези мотриси са с асинхронни тягови двигатели и честотно управление и имат техническа възможност за връщане на енергия в мрежата при спиране и движение в участък с наклон /спускане/. В Софийският метрополитен участъците с големи наклони са много. В участъка Сердика – Младост 1, особено под бул. Драган Цанков, условията позволяват да се икономиса енергия, в режим на задържане на скоростта на мотрисата, както и при спиране.

В изграждания в момента Втори метродиаметър, също има участъци с голям наклон, които определят добри възможности за икономия на енергия в режим на рекулперативно спиране.

За да се осъществи режим на рекулперативно спиране, са необходими следните условия:

1. Изправителите в ТПС да могат да работят в инверторен режим. В момента тяговите агрегати са с неуправляеми 12 фазни изправители. Ако това не е възможно енергията подавана от рекулперираща мотриса е за „вътрешна консумация”. Тя може или да се натрупва в акумулатор на енергия или да има друга мотриса в теглителен режим – консуматор на отделената енергия;
2. Напрежението на мрежата да е близко до номиналното и то по скоро в долната част на допустимите стойности. Това е необходимо, защото рекулпериращата мотриса работи с по-високо от номиналното напрежение и позволява обръщане на посоката на тока.
3. Мотрисите да могат да работят в режим на рекулперативно спиране;
4. Да се осигури консумация на връщаната енергия от рекулпериращата мотриса.

1. Изправители в ТПС

За да се връща енергия в мрежата на високата страна, апаратурата в ТПС трябва да позволява инверторен режим. Изправителите в ТПС са 12 фазни неуправляеми мостови, свързани в схема Ларионов. Схемата на токоизправителите е показана на фиг. 1.

Вижда се, че всеки тягов трансформатор има по две вторични намотки, едната свързана в „звезда“, а другата в „триъгълник“. При такова свързване се получава дефазирание на напреженияте вектори и минимални пулсации. Напрежението, подавано към изправителя е 650V.

За напрежението на страна изправено напрежение са в сила зависимостите [2]:

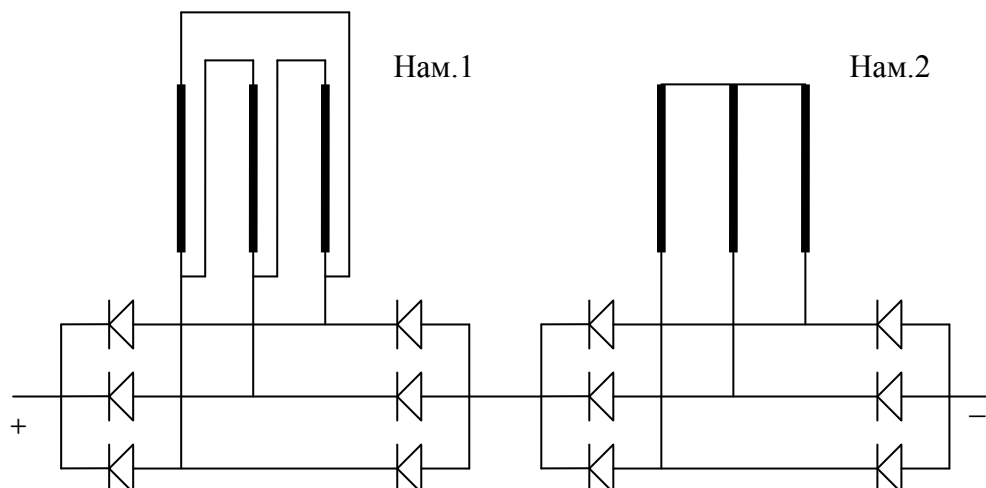
$$(1) \quad U_d = 2 \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{\pi} \cdot U_{2z} = 4,68 \cdot U_{2z} = 2,7 \cdot U_{2t}$$

където U_{2z} е напрежението на намотката, свързана в звезда;

U_{2t} - напрежението на намотката свързана в триъгълник.

При тези стойности на вторичното напрежение на трансформатора, изправеното напрежение на празен ход на шините на ТПС е около 1100 V. Това напрежение е доста високо. Дори при максималните загуби на напрежение /при ток във върхово натоварване/, до мотрисата би достигнало напрежение, по-скоро в горния диапазон на допустимите стойности. А при облекчен режим на работа на ТПС, /през деня, извън върховото натоварване или късно вечер/, при намален брой мотриси на линия и съответно малък товар на ТПС, дори по-високо от горната граница 900 - 1100V.

Следователно, при това напрежение на шините на ТПС, режимът на рекуперативно спиране ще бъде силно затруднен. В момента янсените регулатори на трансформаторите са на най-ниската позиция, което прави невъзможно намалението на напрежението от високата страна на трансформатора.



Фиг. 1

За да се осъществи рекуперация на високата страна на ТПС е необходимо изправителя да може да преминава в инверторен режим. Такъв режим е възможен само при използване на управляеми изправители. Тогава рекуперативен режим на спиране е възможен само за „вътрешна консумация“.

2. Генераторен режим на двигателите на мотрисата

Мотрисите 81-740/741 са с асинхронни тягови двигатели [АТД] с мощност 160 kW, които се захранват от честотни четириквартни преобразуватели [ЧП], позволяващи работа както в изправителен така и в инверторен режим. За преминаването на асинхронен двигател в генераторен режим е необходимо неговата скорост на въртене да е по висока от синхронната ω_0 или да се изпълнява неравенството [1] :

$$(2) \quad \omega > \omega_0.$$

От зависимостта

$$(3) \quad \omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p},$$

където f_1 е честотата на захранващото напрежение подавано от ЧП;

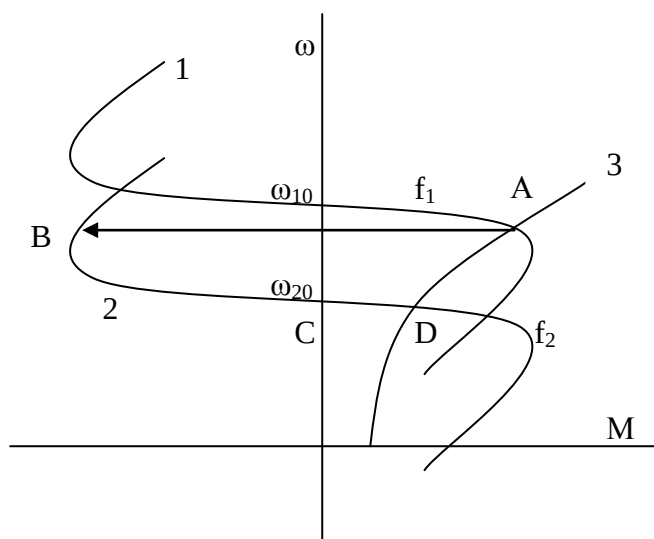
p - чифтовете полюси на АТД.

Вижда се, че при намаляване на честотата на захранващото напрежение от ЧП, се понижава и ω_0 , което е предпоставка за преминаване на двигателя в генераторен режим – фиг. 2.

На фигура 2 са показани две характеристики $\omega = \omega(M)$ на тяговият двигател съответно 1 и 2, при различни честоти на захранващия ЧП f_1 и f_2 . В друг мащаб това е фактически връзката между скоростта на мотрисата и теглителната сила $v = v(F)$.

Пресечната точка на характеристиките на двигателя 1 и 2 с характеристиката на съпротивлението на движение – крива 3 дефинират точката на установен режим на работа – А (при честота f_1) и D (при честота f_2)

При намаляване на скоростта на движение (съответно понижение на честотата от f_1 до f_2), двигателя трябва да отиде от т. А в новата точка на устойчива работа т. В. Преминаването от характеристиката 1 (при честота f_1 , точка А) към характеристика 2 (при честота f_2 , точка В) в първоначалния момент става при запазване скоростта на движение. Това е така, поради съществената разлика в стойностите на електрическата и механичната времеконстанти, като механичната е съществено по-голяма от електрическата.



Фиг. 2

Тогава за характеристика 2 в областта между точките В и С, скоростта на въртене на двигателя е по-голяма от ω_{02} и се изпълнява условието (2) за работа в генераторен режим на тяговите двигатели.

3. Консуматори на върнатата енергия. Възможности

При движението си метромотрисите се захранват с постоянен ток, от контактна релса, с номинално напрежение 750 V, като допустимото отклонение е в диапазон 550 - 970 V.

Тяговите агрегати в подстанциите [ТПС] са диодни /неуправляеми/ и не позволяват промяна на посоката на тока и, съответно, връщане на енергия в мрежата на високата страна. Тогава за консуматор на върнатата, при спиране или спускане под наклон енергия, са възможни следните варианти:

- устройство за акумулиране на енергия в мотрисата, такива решения са известни на базата на използване на суперкондензатори [5];
- устройство за акумулиране на енергия в ТПС – например маховиков акумулатор на енергия [3,4];
- друга, ускоряваща се в този момент мотриса;

3.1. Механични акумулатори на енергия

Механичните акумулаторни устройства се поставят в ТПС, като произвежданите акумулатори са маховикови с различни мощности [3,4]. Когато мотрисата рекуперира маховика се „зарежда“, а при необходимост от допълнителна мощност от него се черпи електроенергия, произведена от куплиран заедно с маховика генератор.

3.2. Акумулатори на енергия на база суперкондензатори

На мотрисата може да се монтира акумулиращо устройство, със суперкондензатори, като те се зареждат при спиране или при спускане по наклон, а при необходимост /изкачване на наклон, пусков режим/ от тях се тегли необходимата мощност [5].

И в двата случая недостатъците се свързват с допълнителен обем, за който трябва да се осигури място в мотрисата или ТПС както и допълнителни средства, които трябва да се вложат.

3.3 Мотриса в участъка

Най-интересен е случая, при който друга мотриса, работеща в пусков режим или при изкачване на наклон, поема рекупериранията енергия. В софийския метрополитен при явно изразените наклони, такъв вариант е напълно реален.

При честотно управление на АТД, е необходимо да се спазва оптималния закон на управление [1]

$$(4) \quad \frac{U_H}{f_H} = \frac{U_1}{f_1} = \frac{U_2}{f_2} = \dots = const$$

От зависимостта (4) се вижда, че при намаляване на честотата на напрежението f , с цел регулиране на скоростта ω_0 , следва и понижение на напрежението на АТД, работещ в генераторен режим – [АГ]. Това означава движение на мотрисата с висока скорост. Скоростта на движение на мотрисата се ограничава от следните условия:

- максимално допустимата скорост на въртене на двигателя;
- ограничение от възможностите на предавката;
- ограничение от възможностите на релсовия път;
- осигуряване на аварийно спиране в предварително зададен спирачен път, при подаване сигнал;
- спиране в рамките на перона.

За ограничение на скоростта се приема най-малкото от изброение по горе ограничения.

Или, наличието на рекуперация, се свежда до изискването напрежението подавано на мотрисите да бъде възможно най-близко до номинално. В момента напрежението на ТПС е много високо, като по данни на експлоатацията на метрополитена, има измерени стойности и над горната граница, приблизително 1000V. При такива стойности на напрежението режима на рекуперативно спиране е затруднен.

Не на последно място стои въпросът за *наличието* на мотриси в другите участъци, които да поемат връщаната енергия.

От ТПС излизат четири захранващи фидера, като всеки захранва по 1 път от двете страни на подстанцията и в двете посоки. Отделните ТПС работят в паралел. Минималния интервал от време между две мотриси гарантира, че във върхов режим на натоварване при минимален интервал на следване на мотрисите, във всеки участък ще има по една мотриса. Това означава, че има налични поне 1-3 мотриси, които да поемат рекуперирания ток.

Наличието на мотриси е гарантирано само при минимален интервал на следване на мотрисите – 3 минути. В моментът в метрополитен София минималния интервал на движение е 4 минути, а в извънвърхов режим 7 - 15 минути. Или тогава вместо 3 мотриси поемащи товара на рекупериращата мотриса в участъка може да има само 1 или никаква. Тогава при рекуперирание е възможно повишаване на напрежението на контактната релса далеч над допустимите стойности и свързаните с това рискове от електрически пробиви на изолацията.

Или основният извод е, че при това положение рекуперацията е трудно приложим режим на спиране.

4. Изводи и препоръки

В настоящият момент, по данни на експлоатационния персонал на база електромер, монтиран в мотрисите, средно измерената върната енергия е в рамките на 4 – 7 % от консумираната. Разбира се, че тези данни подлежат на допълнителен анализ.

Тези числа, като ефект на върната енергия, изглеждат незначителни, но като количество електрическа енергия, при мощност на един метросъстав от порядъка на 2 MW, съвсем не са за пренебрегване. Допълнителен проблем при възможност на работа на ТПС в инверторен режим представлява качеството на произвежданата и консумирана от доставчика електроенергия. Това е така заради факта, че произведената енергия от работещ в инверторен режим изправител има повишено количество висши хармоници.

Явно е, че при вече изградения и пуснат в експлоатация Първи метродиаметър, не могат да се заменят тяговите трансформатори и да се понижи напрежението на вторичната им страна. Много проблематична е и замяната на неуправляемите с управляеми изправители. Решението за Първи метродиаметър, в смисъл на понижение на напрежението на трансформаторите и замяна на изправителите с управляеми, може да се търси при изтичане на техния експлоатационен ресурс. От друга страна, всички ТПС в метрото работят свързани в паралел. Тогава при замяната само на един тягов агрегат /трансформатор + изправител/ с по-ниско напрежение на вторичната страна и възможност за връщане на енергия на база високата страна на ТПС, ще се отрази на цялостната схема. Ще се получи разлика в напреженията на страна постоянен ток и преразпределение на товарите. Това неминуемо води до намаление на сигурността. Следователно за Първи метродиаметър трябва да се реши за поэтапна замяна на агрегатите. Друго решение може да бъде монтирането на механични акумулатори на енергия в ТПС, при наличие на свободното пространство. Такива решения по света са известни, като има монтирани подобни устройства в метрополитените в Ню Йорк /САЩ/, Лион и Париж /Франция/ и др. [3,4].

Възможност е при наличие на място в мотрисите, монтиране на статични акумулатори на на енергия, базирани на приложението на суперкондензатори.

Казаното до тук с пълна сила важи и за изграждащите се в момента Втори метродиаметър, както и продължението на Първи метродиаметър в посока аерогара София. За тях оборудването е поръчано и в ТПС не е предвидена възможност за връщане на енергия в мрежата на високата страна.

Рекуперативно спиране с връщане на енергия в мрежата на високата страна може да се предвиди в Трети метродиаметър за който в момента се водят предпроектни проучвания.

ЛИТЕРАТУРА

[1.] Българанов Л., И. Миленов, Г. Павлов, Ч. Джамбазки, Електрозадвигване, София, 2009, 281 стр.;

[2.] Българанов Л., Електрически транспорт, ТУ-София, 1991г. 248 стр.;

[3.] Flywheels Can Solve Power Supply Problems, IRJ International Railway Journal, march 2003, p 24-25.;

[4.] Urenco's Kinetic Energy Storage System Is Now Commercially Viable, IRJ International Railway Journal, February 2004, p 34-35.

[5.] Куцаров Ст., Суперкондензатори, Инженеринг ревю бр. 6, 2006, електронно списание, <http://engineering-review.bg/engineering-statii.aspx?br=19&rub=183&id=438>

REGENERATIVE BRAKING IN A SOFIA METRO

Todor Yonov

todyon@tu-sofia.bg

*TU "Sofia", Department of EEE, №8, Kl. Ohridsky street
BULGARIA*

Key words: *a metro, convalescence, suppressors, regenerative braking*

Abstract: *The analysis on the enclosure is done in the article, stopping at way of regenerative braking in Sofia metro. It is being analyzed, why is this way be with very small dispatch now despite the opportunities of the things for the 81-740/741 type streetcar to end by the return of energy in the net. The recommendations on such application arrest are made.*