

ЕФЕКТИВНОСТ НА УРЕДБИТЕ ЗА КОМПЕНСИРАНЕ НА РЕАКТИВНА МОЩНОСТ В ТЯГОВИТЕ ПОДСТАНЦИИ НА ЖЕЛЕЗОПЪТНИЯ ТРАНСПОРТ

Георги Димитров¹, Александър Вецков²
gdimitrov@vtu.bg, alex_veckov@rail-infra.bg

- 1) *Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”,
1574 София, ул. Гео Милев № 158*
- 2) *ДП „Национална компания „Железопътна инфраструктура”,
1233 София, бул. Княгиня Мария Луиза” № 110
РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ*

Ключови думи: *Железопътен транспорт, Уредби за компенсирание на реактивна мощност, Ефективност на компенсирането на реактивната мощност.*

Резюме: *В железопътния транспорт на Република България се експлоатират 54 броя тягови подстанции, захранващи над 4700 km разгъната дължина електрифицирана железопътна мрежа. Преимуществено превозите с електрическа тяга се извършват с променливотокови токоизправителни локомотиви, които се явяват значителни консуматори на реактивна мощност и емитират в тяговата мрежа висши хармоници на тока. От друга страна, въздушната контактна система 25 kV, 50 Hz на железопътния транспорт притежава значителна капацитивна проводимост и се явява генератор на реактивна капацитивна мощност. Всички тези особености водят до влошаване качеството на тягово електропотребление в железопътния транспорт, изискващо използването в тяговите подстанции на специализирани уредби за компенсирание на реактивна мощност.*

В доклада са представени резултати от проведено изследване върху ефективността на различни по конструкция и принцип на работа компенсационни устройства, инсталирани в тяговите подстанции на железопътния транспорт. На база проведени измервания на количествените и качествените параметри на електропотребление в тяговите подстанции, при различни експлоатационни условия, е извършена оценка на ефективността на използваните компенсатори на реактивна мощност. Получените резултати са представени в табличен и графичен вид и са формулирани съответни изводи.

ВЪВЕДЕНИЕ

В железопътния транспорт на Република България все още масово се експлоатират променливотокови токоизправителни локомотиви, които се явяват консуматори на реактивна мощност Q_L и емитират в тяговата мрежа висши хармоници на тока [1, 2]. От друга страна, въздушната контактна система 25 kV, 50 Hz на железопътния транспорт се явява генератор на реактивна капацитивна мощност Q_C със

значителна стойност, тъй като притежава значителна капацитивна проводимост. Според проведени изследвания [3], стойността на генерираната капацитивна мощност, отнесена към единица дължина на контактната система, е от $\sim 2,10$ kvar/km при двупътни жп участъци до ~ 3.0 kvar/km в еднопътни тунели, като при повишаване на напрежението, тези стойности нарастват. Освен от експлоатирания железопътен тягов електрически подвижен състав и техническите параметри на електроснабдителната система на железопътния транспорт, качеството на консумираната електрическа енергия силно се влияе и от редица експлоатационни фактори, сред които основно място заемат интензивността и равномерността на движение по железопътните участъци. Всички тези особености водят до общо влошаване качеството на тягово електропотребление в железопътния транспорт, изискващо използването в тяговите подстанции на специализирани уредби за компенсирание на реактивна мощност.

АНАЛИЗ НА ПРОБЛЕМА

От 2001 г. в тяговите подстанции /ТПс/ на железопътния транспорт са инсталирани четириквadrантни електромери за търговско измерване на електрическата енергия, консумирана от националната енергийна система. Измерването се извършва на страна високо напрежение /В.Н./ 110 kV. След приемането през 2002 г. на нова Наредба за образуване и прилагане на цените и тарифите на електрическата енергия, се въведоха нови правила за начисляване на надбавки за консумирана и върната реактивна енергия, като в момента действаща е Наредба № 1 от 14 март 2017 г. за регулиране на цените на електрическата енергия. Влошеното качество на тяговото електропотребление, води до значително увеличаване на финансовите разходи на ДП „Национална компания „Железопътна инфраструктура“ за тягова електроенергия [4].

Както вече беше посочено един от основните фактори за влошаване качеството на електропотребление по отношение фактора на мощност, са масово експлоатиранияте все още у нас токоизправителни локомотиви с постоянно токово тягово електрозадвижване, които освен значителен консуматор на реактивна мощност, се явяват и мощен нелинеен товар, предизвикващ деформация на кривата на тяговия ток.

В таблица 1 са показани обобщени данни от проведено в периода 02÷08 април 2001 г. изследване върху електропотреблението на 31 тягови подстанции, експлоатирани в трите енергосекции на железопътния транспорт у нас [5].

Таблица 1
Обобщени данни за електропотреблението на изследваните 31 тягови подстанции през 2001 г.

Енергосекция	Брой изследвани ТПС	Консумирана активна е-я, E_a	Консумирана реактивна е-я, $E_{r_{ind}}$	Върната реактивна е-я, $E_{r_{cap}}$	Фактор на мощност – среден, PF	Ср. коеф. на завишение на цената, K_{EN}
		kWh	kvarh	kvarh		
София	15	3 066 613	2 243 606	90 198	0,807	1,054
Пловдив	12	1 512 434	932 612	92 797	0,851	1,074
Горна Оряховица	4	516 541	322 100	51 096	0,849	1,112
Общо	31	5 095 588	3 498 318	234 091	0,829	1,069

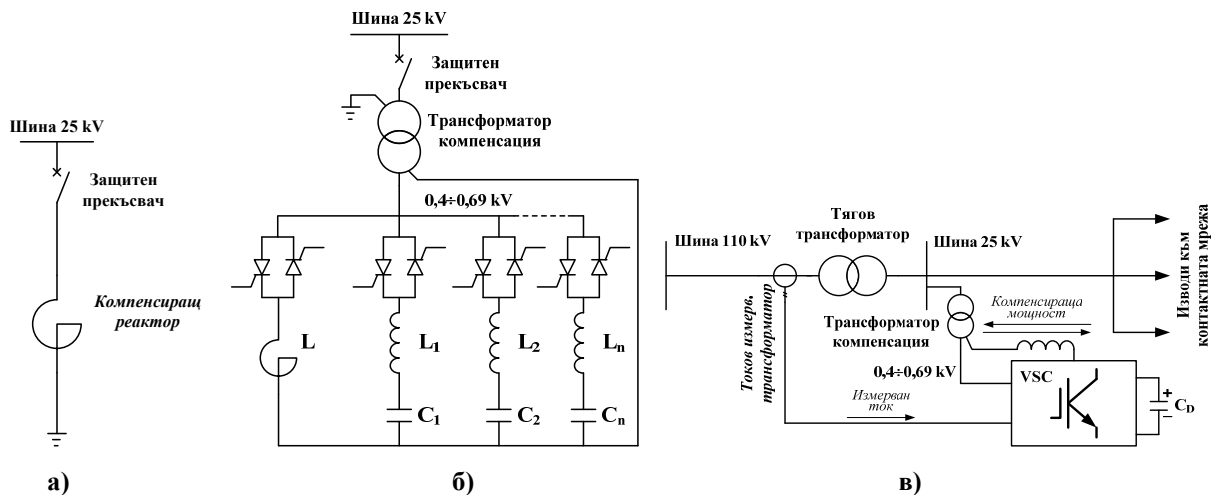
От данните в таблица 1 могат да се направят следните заключения:

- Количеството върната реактивна енергия се колебае в широки граници – от 3÷10% спрямо консумираната активна енергия, което основно се дължи на неравномерността на движение на влаковете в денонощен, месечен и годишен разрез;
- Средният фактор на мощност се движи в границите от 0,81÷0,85, като той е по-висок по стойност от този на експлоатиранияте токоизправителни локомотиви [1, 2].

Техническите решения които могат да бъдат използвани за компенсиране на реактивната мощност в тяговата мрежа са следните:

- Пасивен (нерегулируем) индуктивен дросел за компенсиране на генерираната от тяговата мрежа капацитивна мощност Q_C ;
- Динамичен комбиниран индуктивно-капацитивен компенсатор за Q_L и Q_C ;
- Активен динамичен компенсатор, използващ конвертор на напрежение, който позволява компенсиране на реактивните мощности и хармониците.

На фигура 1 са показани опростени схеми на посочените конструкции компенсатори.



Фиг. 1. Видове схемни решения на компенсатори на реактивна мощност

а) Индуктивен; б) Динамичен индуктивно-капацитивен; в) Активен на база конвертор на напрежение

Нерегулируемият индуктивен дросел (реактор), свързан към събирателната шина 25 kV в тяговата подстанция (фиг. 1, а), в паралел на тяговата мрежа, е най-простото техническо решение. Той позволява да се компенсира единствено и само капацитивната мощност Q_C , генерирана от въздушната контактна система [6].

На фиг. 1, б е показана схема на динамичен компенсатор с тиристорно комутирани реактор и кондензаторни батерии /КБ/. Тиристорно регулираният реактор L позволява поддържане на необходимата средна стойност на компенсиращата индуктивна мощност. Кондензаторните батерии са разделени на отделни секции с определен капацитет $C_1, C_2 \dots C_n$, които се управляват индивидуално с помощта на тиристорни регулатори. Свързаните последователно във веригата на КБ индуктивности $L_1, L_1 \dots L_n$ служат за ограничаване скоростта на нарастване на тока през тиристорите и предотвратява възникването на резонанс с мрежата. Тези компенсатори имат следните свойства: динамично управление; средно време за включване от половин период на напрежението (максимум един период); не генерират хармоници.

Качествено нова конструкция компенсатори са тези, базирани на конвертор на напрежение /VSC/ – фиг. 1, в. Последният представлява мостова схема, реализирана с напълно управляеми полупроводникови елементи – биполярни транзистори с изолиран гейт /IGBT/. При входящо постоянно напрежение, формирано от кондензатора C_D , чрез широчинно-импулсна модулация на изхода на VSC се получава еднофазно променливо напрежение. Генерираното напрежение от VSC се подава към събирателната шина 25 kV в тяговата подстанция през реактор и допълнителен трансформатор Н.Н./Ср.Н. При промяна на енергийните характеристики, измервани на страна 110 kV, се

осъществява двупосочен обмен между VSC и събирателната шина 25 kV на необходимата по характер компенсираща реактивна мощност.

МЕТОД НА ПРОВЕЖДАНЕ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Данните за електроенергийното потребление на изследваните тягови подстанции са получени от електромерите за търговско измерване в тяговите подстанции [7]. За целите на изследването, те са аналитично обработени, като за оценка на ефектите от инсталирането на компенсиращи устройства в ТПС са използвани следните показатели:

❖ Среден фактор на мощност - PF .

Показателят се изчислява по формулата:

$$(1) \quad PF = \frac{Ea}{\sqrt{Ea^2 + Er_{ind}^2}}$$

където:

Ea е консумираната активна електроенергия, измерена на страна В.Н. 110 kV в дадена тягова подстанция за определен период от време, kWh;

Er_{ind} – консумирана реактивна електроенергия, измерена на страна В.Н. 110 kV за периода от време, през който е измерена активната електроенергия Ea , kvarh.

От стойността на този показател зависи начисляването на надбавка за консумирана от мрежата реактивна енергия.

❖ Коефициент на завишаване цената на активната електроенергия от надбавки за консумирана и върната реактивна енергия - K_{EN} .

Този коефициент се изчислява с използване на следната формула:

$$(2) \quad K_{EN} = Ea + 0,1 \cdot (Er_{ind (PF < 0,9)} - 0,49 \cdot Ea) + Er_{cap}$$

където:

$Er_{ind (PF < 0,9)}$ е количеството консумирана реактивна електроенергия при реализиран среден фактор на мощност $PF < 0,90$, измерена на страна В.Н. 110 kV в дадена тягова подстанция за определен период от време, kvarh;

Er_{cap} – върната реактивна електроенергия в захранващата енергосистема, измерена на страна В.Н. 110 kV за периода от време, през който са измервани енергиите, kvarh.

Чрез коефициента K_{EN} се отчита относителното увеличаване на единичната цена на активната електрическа енергия, следствие начислени надбавки за нисък фактор на мощност и върната реактивна енергия.

РЕЗУЛТАТИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

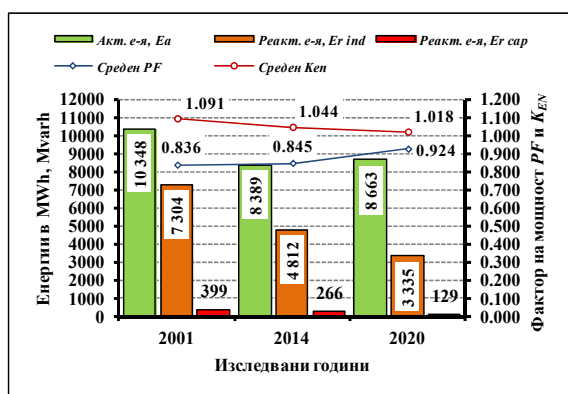
Изследването върху енергийната структура на електропотребление е проведено за 13 тягови подстанции с различен режим на натоварване. То обхваща периода от 2001 до 2020 г., през който са избрани 3 базови години: 2001 г. – през която в тяговите подстанции не са монтирани компенсиращи устройства; 2014 г. – преходна година с инсталирани в над 70% от изследваните ТПС на пасивни индуктивни компенсатори, а в останалите - на динамични и 2020 г. – в която 9 от общо 13-те изследвани ТПС са оборудвани с динамични индуктивно-капацитивни и активни VSC компенсатори.

В таблица 2 са показани обобщени данни от енергийните измервания, осреднени за един месец, както и изчислените стойности за средно месечния фактор на мощност PF и коефициента на относително увеличаване цената на електрическата енергия K_{EN} .

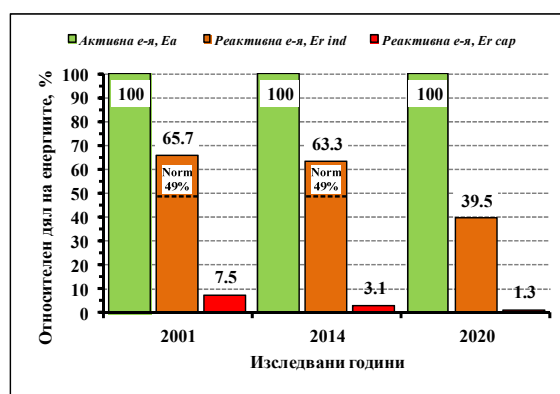
На фигура 2 графично са илюстрирани резултатите от изследването, а на фигура 3 са показани диаграми на относителния дял на консумираната и върнатата реактивна енергия спрямо активната енергия, която е отчасти базова за определяне на надбавките.

Таблица 2
Данни за средно месечното електропотребление през 2001, 2014 и 2020 г. на изследваните ТПС

Година	Брой изсл. ТПС / тип компенсатори	Консумирана активна е-я, E_a	Консумирана реактивна е-я, $E_{r ind}$	Върната реактивна е-я, $E_{r cap}$	Ср. фактор на мощност, PF	Среден коефициент K_{EN}
		kWh	kvarh	kvarh	-	-
2001	12 / няма	10 348 257	7 303 695	398 549	0.836	1.091
	Средно претеглени стойности за изследваните през 2001 г. 31 ТПС					0,829
2014	13 / основно стат.	8 389 061	4 812 375	266 238	0.845	1.044
	Средно претеглени стойности за всичките 52 ТПС в експлоатация					0,821
2020	13 / основно динам.	8 663 408	3 335 351	128 675	0.924	1.018
	Средно претеглени стойности за всичките 54 ТПС в експлоатация					0,876



Фиг. 2. Диаграма на енергийното потребление



Фиг. 3. Относителен дял на енергиите

ОСНОВНИ ИЗВОДИ ОТ ПРОВЕДЕНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

Получените обобщени резултати от проведеното изследване, показани в табл. 2, позволяват да са направят следните основни изводи:

- Средният фактор на мощност за изследваните 13 тягови подстанции се повишава от **0,836** през 2001 г. на **0,924** през 2020 г. На годишна база, през 2020 г. средният фактор на мощност за всичките 54 тягови подстанции в експлоатация е **0,876**.

- За изследваните 13 тягови подстанции, средната стойност на коефициента K_{EN} , отчитащ относителното увеличаване на единичната цена на активната електрическа енергия, през 2001 г. има стойност **1,091**, а през 2020 г. стойността му е **1,018**. Спрямо 2001 г., стойността на K_{EN} за всичките 54 ТПС намалява с около **4,5%**, което води и до снижаване на финансовите разходи за тягова електрическа енергия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведеното изследване показва, че след инсталирането във всички тягови подстанции на устройства за компенсиране на реактивната мощност се наблюдава значително намаляване на надбавките за реактивна мощност. Така при годишно потребление през 2020 г. от около 305 млн киловатчаса, реализираният ефект, приведен към 2001 г., се изразява в спестени финансови средства за заплащане цената на повече от 13 млн киловатчаса. Конкретният избор на типа и мощността на компенсиращите устройства, които да бъдат инсталирани в предстоящите за модернизация ТПС, изисква провеждане на детайлни изследвания за всяка една от тях.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Ангелов И., П. Матов, Анализи на тяговия ток при локомотиви с асинхронни тягови двигатели, Годишник на ТУ - София, Том 66, книга 1, 2016 г. ISSN 1311-0829
- [2] Павлов Г., М. Томчева, И. Търпов, Експериментално изследване на енергетичните параметри на модернизирани тиристорни локомотиви серия 46-200, Научно списание Механика, Транспорт, Комуникации”, том 12, бр. 1, 2014 г. ISSN 1312-3823
- [3] Матов П., Р. Кахърков, Разпределен капацитет на контактни мрежи за променлив ток, Научно списание Механика, Транспорт, Комуникации”, бр. 3, 2007 г. ISSN 1312-3823
- [4] Г. Димитров, З. Бакалов, В. Ценов, Проблеми на електроенергийната ефективност на електрифицирания железопътен транспорт, Сборник доклади от Научна конференция „СМОЛЯН – 2004”, 2004 г.
- [5] Обработка на резултати от експериментални изследвания за определяне $\cos \varphi$ на тяговата мрежа, НИТИЖТ ЕООД, 2001 г.
- [6] Матов П., И. Ангелов, Б. Христов, И. Донеv, Р. Салкоски, Пасивен компенсатор на капацитивна енергия в контактна мрежа 25 kV, Научно списание Механика, Транспорт, Комуникации”, бр. 3, 2009 г. ISSN 1312-3823
- [7] Данни за месечното електроенергийно потребление на тяговите подстанции ДП „НКЖИ” за периода 2013-2020 г., Поделение „Електроразпределение” - ДП „НКЖИ”, 2021 г.

EFFICIENCY OF REACTIVE POWER COMPENSATION SYSTEMS IN TRACTION SUBSTATIONS OF RAILWAY TRANSPORT

Georgi Dimitrov¹, Aleksandar Vetskov²
gdimitrov@vtu.bg, alex_veckov@rail-infra.bg

¹⁾ *Todor Kableshkov University of Transport, 1574 Sofia, 158 Geo Milev Str,*
²⁾ *National Railway Infrastructure Company, 1233 Sofia, 110 Knyaginya Maria Luiza Blvd,*
THE REPUBLIC OF BULGARIA

Key words: *Electrified railway transport, Reactive power compensation systems, Efficiency of Reactive power compensation.*

Abstract: *In the railway transport of the Republic of Bulgaria operates 54 traction substations, supplying over 4700 km of electrified railway network. Mainly transport activity with electric traction is performed with AC rectifier locomotives, manufactured more than 35 years ago, which are consumers of reactive power and emitted higher harmonics of the current in the traction network. On the other side the 25 kV, 50 Hz overhead contact system of railway transport has a significant capacitive conductivity, and is a generator of reactive capacitive power. All these peculiarity lead to a deterioration in the quality of traction electricity consumption in railway transport, requiring the use in traction substations of specialized systems to compensate for reactive power.*

The report presents the results of a research on the efficiency of different in design and principle of operation compensating devices, installed in the traction substations of railway transport. Based on measurements of the quantitative and qualitative parameters of electricity consumption in the traction substations, under different operating conditions, an evaluation of the effectiveness of the used reactive power compensators was performed. The obtained results are presented in tabular and graphical form and appropriate conclusions are formulated.