

А.П. Куцый, Д.А. Конюшкин, В.С. Чугуевский

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ УСТАНОВОК ПРОДОЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ НА ВСЖД

Аннотация. Повышение пропускной способности грузового железнодорожного сообщения является актуальной постоянной задачей для экономического развития регионов, повышения товарооборота и снижения логистических издержек. Одним из ключевых ограничивающих факторов повышения объема перевозок является наличие предела доступной мощности на системах тягового электроснабжения и снижение напряжения на токоприемниках электроподвижного состава ниже минимального уровня.

Существует различные способы организационных и технических подходов к решению этой задачи. Каждый из способов имеет свои особенности и специфику. В данной статье упор сделан на применение установок продольной емкостной компенсации (УПК) на отсасывающих фидерах тяговых подстанций. Проведено сравнение применения УПК и других технических подходов для повышения уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, электроподвижной состав, пропускная способность, напряжение, качество электрической энергии.

A.P. Kutsyi, D.A. Konyushkin, V.S. Chuguevsky

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF LONGITUDINAL CAPACITIVE COMPENSATION UNITS ON THE VSZHD

Annotation. Increasing the capacity of freight rail transport is an urgent ongoing task for the economic development of the regions, increasing trade turnover and reducing logistics costs. One of the key limiting factors for increasing the volume of traffic is the availability of a limit on available power on traction power supply systems and a decrease in voltage on current collectors of electric rolling stock below the minimum level. There are various ways of organizational and technical approaches to solving this problem. Each of the methods has its own characteristics and specifics. In this article, emphasis is placed on the use of longitudinal capacitive compensation (CPC) installations on suction feeders of traction substations. A comparison of the use of the CPC and other technical approaches to increase the voltage level on the current collector of an electric rolling stock is carried out.

Keywords: reactive power compensation, electric rolling stock, throughput, voltage, quality of electrical energy.

Принцип работы установок продольной емкостной компенсации (УПК)

Тяговая нагрузка, возникающая в следствии движения грузовых составов, характеризуется значительной величиной реактивной мощности и резко переменным характером. При организации такого грузового движения (с поездами массой 6000, 7100, 9000 и т.д.) возникает значительное токопотребление и падение напряжения на токоприёмнике электровозов [1-5]. Это вызывает наличие ограничений по пропускной и провозной способности на ряде межподстанционных зон Восточно-Сибирской железной дороги [6-9].

Задача поддержания номинального значения напряжения является актуальной и важнейшей с точки зрения снижения ограничений на пропускную и провозную способность по энергообеспечению. Одним из эффективных способов решения этой задачи является применение установок продольной емкостной компенсации реактивной мощности (УПК) на тяговых подстанциях и в тяговой сети для компенсации реактивно-индуктивного сопротивления сети внешнего электроснабжения, тягового трансформатора и тяговой сети.

При наличии УПК на подстанции полное сопротивление сети за точкой её включения вычисляется по формуле:

$$X\Sigma = X_c + X_{тт} - X_{упк}, \quad (1)$$

где $X_{упк}$ – емкостное сопротивление УПК, $X_{тт}$ – индуктивное сопротивление сети внешнего электроснабжения и тягового трансформатора, $X_c + X_{тт}$ – индуктивное сопротивление сети внешнего электроснабжения и тягового трансформатора.

Потеря напряжения при наличии УПК:

$$\Delta U = I_n X\Sigma \sin \varphi_n + I_n R\Sigma \cos \varphi_n - I_n X_{упк} \sin \varphi_n, \quad (2)$$

где I_n – тяговый ток нагрузки, φ_n – угловой сдвиг между тяговым током и напряжением.

УПК компенсирует реактивное сопротивление, что позволяет снизить общее сопротивление сети и потери напряжения. Применение УПК наиболее эффективно в тяговых сетях со значительным реактивно-индуктивным токопотреблением и значительным индуктивным сопротивлением тяговой сети, системы внешнего электроснабжения и тягового трансформатора. Обычно, такие участки отличаются большой протяженностью, горно-перевальным рельефом и наличием тяжеловесных поездов. Благодаря использованию плавнорегулируемых или ступенчаторегулируемых УПК можно добиться стабилизации напряжения на уровне номинального без эффекта перекомпенсации. На некоторых участках Восточно-Сибирской железной дороги использование УПК на смежных подстанциях позволило повысить напряжения на 4 – 5 кВ.

Опыт разработок и эксплуатации УПК

В 1970г на тяговой подстанции Облепиха ВСЖД впервые на сети железных дорог была включена УПК в плечо (фазу) одностороннего питания в сторону подстанции Тайшет, работала в течении 10 лет и обеспечивала нормативные уровни напряжения на токоприёмнике ЭПС. Межподстанционная зона Облепиха – Тайшет имела одностороннее питание до поста секционирования Байроновка с разделом контактной сети с помощью нейтральной вставки в связи с раздельной работой энергоснабжающих организаций Иркутскэнерго и Красноярскэнерго. После перехода энергосистем на параллельную работу отпала необходимость раздела питания по контактной сети и УПК подстанции Облепиха была переделана в установку параллельной компенсации.

В 1975г на тяговой подстанции Бискамба Красноярской железной дороги была включена УПК в плечо (фазу) и в последствии на тяговой подстанции Югачи в плечо межподстанционной зоны Бискамба – Югачи. Необходимость такого включения была вызвана организацией движения состыкованных поездов повышенного веса и низкими уровнями напряжения на токоприёмнике ЭПС в связи с горным профилем участка в данной межподстанционной зоне.

с 1996г по 2001г находилась в эксплуатации УПК на тяговой подстанции Выдрино ВСЖД для обеспечения уровня напряжения одностороннего питания контактной сети на две межподстанционные зоны Байкальск – Выдрино - Переёмная длиной 77 км. Тяговая подстанция Выдрино и Переёмная отключалась для питания тяги и на подстанции Выдрино включалась УПК величиной емкостного сопротивления 8 Ом, мощностью 8000 кВАр. По подстанции Выдрино проходил раздел двух энергосистем Иркутскэнерго и Бурятэнерго со значительной разницей стоимости за электроэнергию на тягу поездов (в 4 раза). За счёт такой разницы тарифов на электроэнергию обеспечивалась значительная экономия затрат на электроэнергию по ВСЖД. Напряжение на токоприёмнике обеспечивалось применением УПК на подстанции Выдрино.

Эксплуатационная эффективность УПК

За годы использования, установки продольной компенсации зарекомендовали себя как эффективный и надежный способ повышения напряжения на токоприемнике ЭПС. Благодаря УПК появляется возможность обеспечивать стабилизацию напряжения на тяговых шинах подстанции до номинального уровня, повышается эффективность РПН тяговых трансформаторов. При использовании УПК возможен переход контактной сети на одностороннее питание до постов секционирования с шунтированием воздушного промежутка при проходе токоприёмника с целью уменьшения потери мощности от уравнительных токов. За счет снижения полной нагрузки в тяговой сети улучшаются показатели качества электрической энергии и энергоэффективность [10,11].

В качестве примера эффективности использования УПК рассмотрено сравнение УПК с другими техническими способами повышения уровня напряжения для нескольких спешных межподстанционных зон Восточно-Сибирской железной дороги при организации тяжеловесного движения поездов при параметрах движения: график движения – пакетный, чётное направление – масса поездов 6300 т, межпоездной интервал - 10 минут; нечетное направление: масса - 3500 тонн, межпоездной интервал - 8 минут.

МПЗ	Увеличение напряжения на токоприемнике ЭПС с наименьшим напряжением, кВ				
	ФКУ на ПСК	УПК в фазе С	УЭП на всю МПЗ	КУ в питающих фазах	СТЭ2х25 кВ
ТП1 – ТП2	0,69	2,67	1,76	1,78	-
ТП2 – ТП3	0,81	2,71	1,41	1,81	-
ТП3 – ТП4	0,83	3,14	1,71	1,99	1,91
ТП4 – ТП5	0,75	2,79	1,37	1,21	1,57
ТП5 – ТП6	0,73	3,32	1,78	1,72	3,35
ТП6 – ТП7	1,03	1,92	1,39	2,33	1,5
ТП7 – ТП8	0,6	3,61	2,52	3,21	3,35
ТП8 – ТП9	0,49	4,42	1,29	1,21	3,78

Примечание: ФКУ – устройство фильтрации и компенсации реактивной мощности УЭП – усиливающий А-185 и экранирующий провод А -185 на всю межподстанционную зону; КУ – устройство параллельной компенсации реактивной мощности; СТЭ 2х25 кВ - система тягового электроснабжения с 4-мя автотрансформаторами в межподстанционной зоне при существующих трансформаторах ТП; ПСК – пост секционирования, ТП – тяговая подстанция.

Заключение

Применение устройств продольной компенсации реактивной мощности в заземлённой фазе С смежных тяговых подстанций лимитирующей межподстанционной зоны обеспечивает наибольший эффект повышения напряжения на токоприёмнике ЭПС (на некоторых МПЗ на 3-4 кВ) [12,13].

Экономический эффект применения УПК образуется за счет: повышения напряжения на токоприёмнике ЭПС, увеличения скорости движения поездов и пропускной способности поездов на межподстанционных зонах ТП с УПК; улучшения технико-экономических характеристик электроподвижного состава: КПД и коэффициента мощности в связи с увеличением напряжения на токоприемнике ЭПС до номинального значения и уменьшением угла коммутации преобразователя ЭПС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Банщикова А.А. Прогнозирование объема пропуска перевозимых на нетяговом подвижном составе крупнотоннажных контейнеров в экспортно-импортном сообщении в направлении РФ-КНР / А.А. Банщикова, М.П. Базилевский, В.А. Тихомиров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – Т. 54, № 2. – С. 90–94.
2. Alekseeva T.L., Ryabchyonok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A., Astashkov N.P., Martusov A.L., Alekseev M.E. Parallel operation of an inverter with an electrical ac network IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019. 2020. С. 012003.
3. Патент на изобретение № 2427878. Российская Федерация. Способ и устройство регулирования мощности нагрузки / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, Л.А. Астраханцев и другие. Опубликовано в Б.И., № 24, 2011.
4. Энергетическая эффективность в электрических цепях с полупроводниковыми приборами / Т.Л. Алексеева, Н.Л. Рябченко, Л.А. Астраханцев и др. // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2020. Т. 20, № 2. С. 89–98. DOI: 10.14529/power200208.
5. Энергетическая эффективность тягового привода магистральных электровозов / Н.Л. Рябченко, Т.Л. Алексеева, А.Л. Астраханцев и др. // Изв. Транссиба. 2020. № 1 (41). С. 29–41.
6. Куцкий А.П., Овечкин И.С., Галков А.А. Повышение пропускной способности участка Якурим - Киренга для обеспечения тяги сдвоенных электроподвижных составов массой 14200 тонн // Электронный научный журнал «Молодая наука Сибири». 2022. № 2(16)
7. Куцкий А.П., Овечкин И.С., Галков А.А. Повышение пропускной способности участка Якурим - Киренга для обеспечения графика движения поездов с максимальной массой 7100 тонн. // Электронный научный журнал «Молодая наука Сибири». 2022. № 2(16)
8. Куцкий А.П. Снижение несимметрии и несинусоидальности в линиях электропередач, питающих тяговые подстанции // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2018. Т. 1. С. 692-696.
9. Черепанов А.В. Тихомиров В.А., Куцкий А.П. Снижение несимметрии и гармонических искажений в районах электроснабжения нетяговых потребителей. Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2017. - №3 (55). - С. 145-151.
10. Черепанов А.В., Куцкий А.П. Использование управляемых источников реактивной мощности в системах тягового электроснабжения. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20. № 9(116). С. 103-110.
11. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Куцкий А.П. Моделирование несинусоидальных режимов систем тягового электроснабжения, оснащенных установками компенсации реактивной мощности//Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 1 (57). С. 72-79.
12. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS 2018615172, 12.03.2018 Имитационная динамическая модель системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ// Ушаков В.А., Куцкий А.П., Черепанов А.В.
13. Арсентьев Г.О., Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Куцкий А.П., Нгуен В.Х., Черепанов А.В., Чан З.Х., 2019. Управление режимами систем электроснабжения железных дорог на основе технологий интеллектуальных сетей (SMART GRID). Иркутск: ИрГУПС, pp: 412.

REFERENCES

1. Banshchikova A.A., Bazilevsky M.P., Tikhomirov V.A. THE Forecasting of pass volume of large containers carried on nontractive rolling stock in the export-import communication in towards from Russian Federation to China [Increase of efficiency of electric energy recovery into AC electrical networks]. Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2017. Vol. 54, No. 2. Pp. 90–94.

2. Alekseeva T.L., Ryabchyonok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A., Astashkov N.P., Martusov A.L., Alekseev M.E. Parallel operation of an inverter with an electrical ac network IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019. 2020. C. 012003.

3. Patent for invention № 2427878. The Russian Federation. Method and device for load power control [Patent na izobretenie № 2427878. Rossijskaja Federacija. Sposob i ustrojstvo regulirovaniya moshhnosti nagruzki]. N. L. Ryabchenok, T. L. Alekseeva, L. A. Astrakhantsev et al. Published in the Official Bulletin «Inventions. Utility Models», 2011, № 24

4. Alexeyeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A. Energeticheskaya effektivnost' v elektricheskikh tsepyakh s poluprovodnikovymi priborami [Energy efficiency in electrical circuits with semiconductor devices]. Vestnik YurGU. Seriya «Energetika». [Bulletin of the South Ural State University. Series: “Power engineering”], 2020. Vol. 20. No. 2. Pp. 89–98.

5. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A. Energeticheskaya effektivnost' tyagovogo privoda magistral'nykh elektrovozov [Energy efficiency of mainline electric locomotive traction drive]. Izvestiya Transsiba [Bulletins of Transsib], 2020, no. 1 (41), pp. 29–41.

6. Kutsyi A.P., Ovechkin I.S., Galkov A.A. Increasing the throughput capacity of the Yakurim - Kirenga section to provide traction for twin electric rolling stock weighing 14200 tons // Electronic scientific journal "Young Science of Siberia". 2022. No. 2(16)

7. Kutsyi A.P., Ovechkin I.S., Galkov A.A. Increasing the capacity of the Yakurim - Kirenga section to ensure the timetable of trains with a maximum weight of 7,100 tons. // Electronic scientific journal "Young Science of Siberia". 2022. № 2(16)

8. Kutsyi A.P. Reduction of asymmetry and non-sinusoidality in power transmission lines feeding traction substations // Transport infrastructure of the Siberian region. 2018. Vol. 1. pp. 692-696.

9. Cherepanov A.V. Tikhomirov V.A., Kutsyi A.P. Reduction of asymmetry and harmonic distortions in areas of power supply to non-power consumers. Modern technologies. System analysis. Modeling. - 2017. - №3 (55). - Pp. 145-151.

10. Cherepanov A.V., Kutsyi A.P. The use of controlled reactive power sources in traction power supply systems. Bulletin of the Irkutsk State Technical University. 2016. Vol. 20. No. 9(116). pp. 103-110.

11. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Kutsyi A.P. Modeling of non-sinusoidal modes of traction power supply systems equipped with reactive power compensation units//Modern technologies. System analysis. Modeling. 2018. No. 1 (57). pp. 72-79.

12. Certificate of registration of the computer program RUS 2018615172, 03/12/2018 Simulation dynamic model of a 25 kV AC traction power supply system// Ushakov V.A., Kutsyi A.P., Cherepanov A.V.

13. Arsentiev G.O., Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Kutsyi A.P., Nguyen V.H., Cherepanov A.V., Chan Z.H., 2019. Management of modes of railway power supply systems based on SMART GRID technologies. Irkutsk: IrGUPS, pp: 412.

Информация об авторах

Куцый Антон Павлович – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kutsyi_ap@irgups.ru.

Конюшкин Дмитрий Александрович – студент группы КТ. 1-23-1, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kutsyi_ap@irgups.ru.

Чугуевский Вячеслав Сергеевич – студент группы СОД.1-19-1, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kutsyi_ap@irgups.ru.

Information about the authors

Kutsyi Anton Pavlovich – senior student of the Department of «Electric Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kutsyi_ap@irgups.ru .

Konyushkin Dmitry Alexandrovich – student of the KT. 1-23-1 group, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kutsyi_ap@irgups.ru .

Vyacheslav Sergeevich Chuguevsky- student of the SOD.1-19-1, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kutsyi_ap@irgups.ru .