

UDC 621.331:621.311.4:621.3.025

D. O. BOSIY^{1*}

^{1*}Dep. «Railways Power Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (050) 698 23 95, e-mail dake@i.ua

POWER QUALITY COMPLEX ESTIMATION AT ALTERNATING CURRENT TRACTION SUBSTATIONS

Purpose. At alternating current traction substations are used three-winding transformers. This scheme comes to significant costs from power quality disturbances at each supplier. The most significant power quality indices at alternating current traction substation are voltage deviation, voltage unbalance and harmonic distortion. The purpose of this article is power quality complex estimation at two traction substations that work on the one district of traction network. **Methodology.** The measurements were made according to accepted program during 24 hours with 1 sec discretization. A few power quality analyzers PM175 are used to record data with time synchronization. The scheme of measurements means that devices are connected through current and potential transformers at the each level of voltage. **Findings.** Voltage level at different substation is various due to power losses in primary network. The voltage in one phase of 1-st substation is bigger than in other phases. Voltage THD values according to standard requirements are below norm only for primary 154 kV networks. For another traction and regional networks voltage THD values are above norm value. The voltage unbalances in 154 kV networks are below voltage unbalance in 35 kV networks. Besides the voltage unbalance in 154 kV network is below 2% that complies with the requirements of standard. At the same time we can consider that voltage and current spectrums consist from discrete harmonics with frequencies that multiples of the fundamental frequency. **Originality.** Voltages at the connection points of traction substations to supply lines are complex stationary random process that determines the voltage mode of the external power supply system of each traction substation. The flows of active and reactive power of the higher harmonics at AC traction substation are directed opposite power of the fundamental harmonic. The power flows on higher harmonics create the disturbing impact on related devices. The total power at AC traction substation consists of 61.8% of the active power, 32.5% of the reactive power of the 1st harmonic and 5.7% of the distortion power in the quadrature components. **Practical value.** Analysis of the quadrature components suggests that traditional approaches to reactive power compensation at the fundamental frequency will be sufficiently effective. But the influence of the distortion power on reducing energy losses must be also researched. Besides reactive power compensation should be considered with the issue of reducing the basic power quality indices to standardized values.

Keywords: power quality; alternating current; three-phase system; traction substation; measurement; harmonic; distortion; unbalance; spectrum; powers flow

Introduction

The global electrification of railway transport in Soviet Union force to use three-winding transformers at AC traction substation. The advantage of this scheme is in refusing from individual transformer for regional power supply. In that case all regional suppliers consume electric power from third winding of transformer which called regional. But in real these scheme comes to significant costs from power quality disturbances at each supplier.

The most significant power quality indices at AC traction substation are voltage deviation, voltage unbalance and harmonic distortion.

As a rule regional suppliers have some voltage increasing in one of three phases. Such increasing caused not equaling load of left and right side of traction substation. Currents of left and right sides

load two working windings. In the third winding flows the difference of that currents with 1/3 multiplier. Therefore third winding are not fully loaded and it caused power quality problems.

Each power transformer at AC traction substation has voltage regulation device which works under load. But it regulates voltage in all windings together and can't be used for three-phase balancing. Besides the voltage mode at AC traction substation is choose to provide minimal voltage level at the most difficult district of traction network.

Purpose

The purpose of this article is power quality complex estimation at two traction substation that works on the one district of traction network.

Methodology

The measurements were made according to accepted program during 24 hours with 1 sec discretization. A few power quality analyzers such PM175 are used to record data with time synchronization. Simplified scheme of measurements are shown at Fig. 1. The scheme means that devices are connected through current and potential transformers at the each level of voltage.

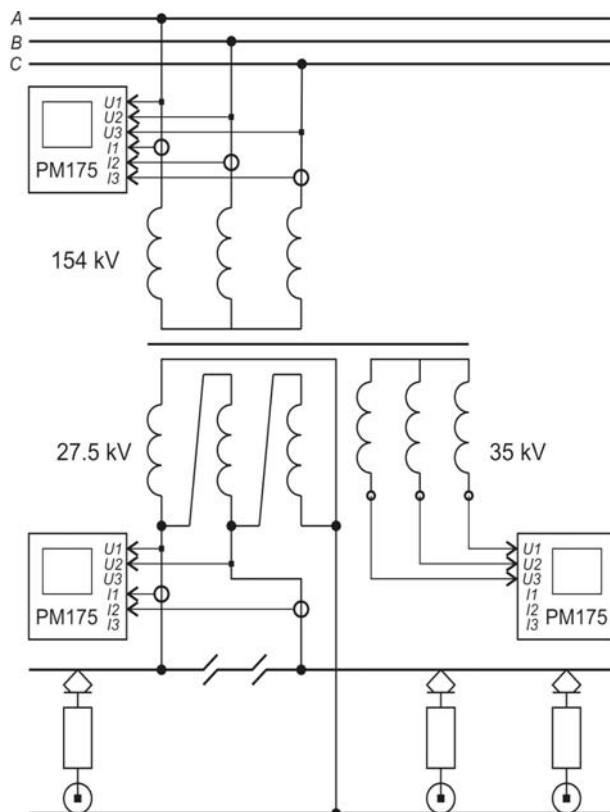


Fig. 1. The scheme of measurements at AC traction substation

Voltage deviations in primary network 154 kV of each traction substation are shown at Fig. 2 during 24 hours. Voltage level at different substation is various due to power losses in primary network. Besides, the voltage in one phase of 1-st substation is bigger than in other phases.

Voltage regulating devices helps to align voltages at other points of coupling either 35 kV or 27.5 kV. Voltage deviations in these networks of one traction substation are shown at Fig. 3. When voltage equalization in 35 kV is needed the compensation current may flow through traction network. In this case compensation current causes additional useless power losses.

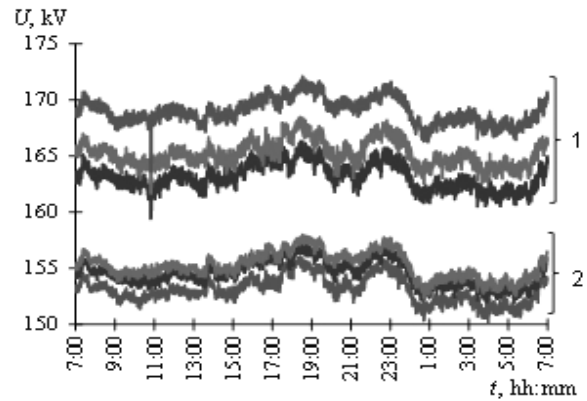


Fig. 2. Voltage deviations in 154 kV primary networks

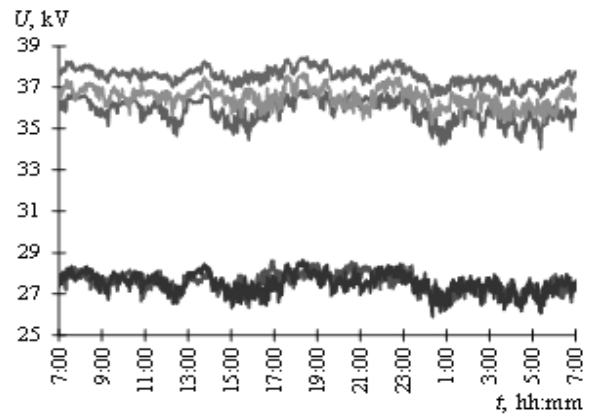


Fig. 3. Voltage deviations in 35 kV and 27.5 kV networks

Total harmonic distortion and three-phase unbalance

Voltage total harmonics distortions (THD) for each phase are similar. Voltage THD values according to standard requirements [4] are below norm only for primary 154 kV networks (Fig. 4). For another traction and regional networks voltage THD values are above norm value.

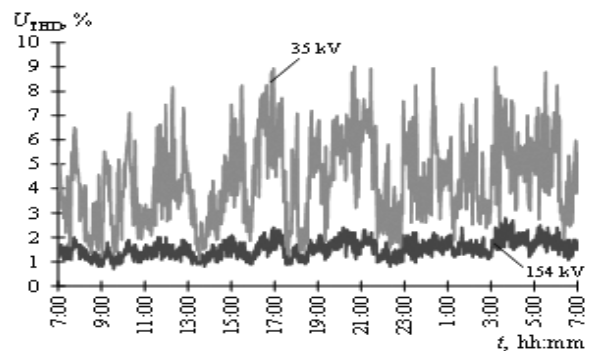


Fig. 4. Voltage distortions in 35 kV and 154 kV networks

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

According to standard [4] the norm of voltage THD values for 110 – 330 kV networks are below 2%. As for 35 kV and 27.5 kV networks the norm values are below 4%.

The norm of voltage unbalance is 2% and it doesn't depend on the voltage range.

The voltage unbalance series are shown at Fig. 5. As can be seen the voltage unbalance in 154 kV networks are below voltage unbalance in 35 kV networks. Besides the voltage unbalance in 154 kV network is below 2% that complies with the requirements of standard. The voltage unbalance in 35 kV network is higher than 2% and its maximum reached within 4.7% value.

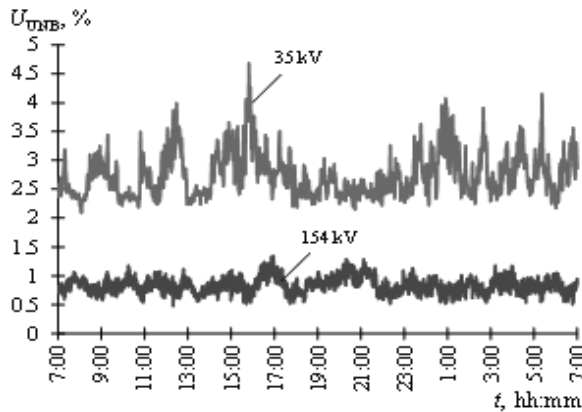


Fig. 5. Voltage unbalance in 35 kV and 154 kV networks

Traditionally the voltage unbalance caused by unbalancing currents in a three-phase system. The primary currents at one substation are shown at Fig. 6 as fields of points. Each point is defining the end of primary current vector at complex plot.

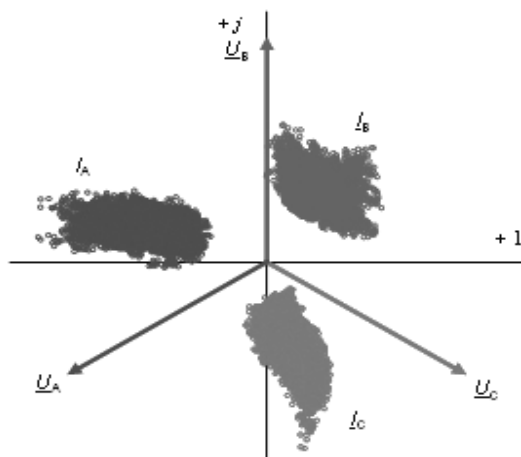


Fig. 6. Currents in 154 kV primary network at complex plot

It can be seen from Fig. 6 that currents in second phase (*B*) are lower than in other phase. In this case phase *A* and *C* are working. The phase *B* is the least loaded. Besides the phase *A* has the lowest power factor because the angle of load in this phase is the higher than in other phases.

Detail waveform researching

The voltage and current waveforms are very different from the sine (Fig. 7). Besides the current waveform are lags from the voltage waveform due to inductive component in traction load.

Before Fourier analysis check the discreteness of spectrum is needed. This check may be performed by comparing RMS values that defined by various methods.

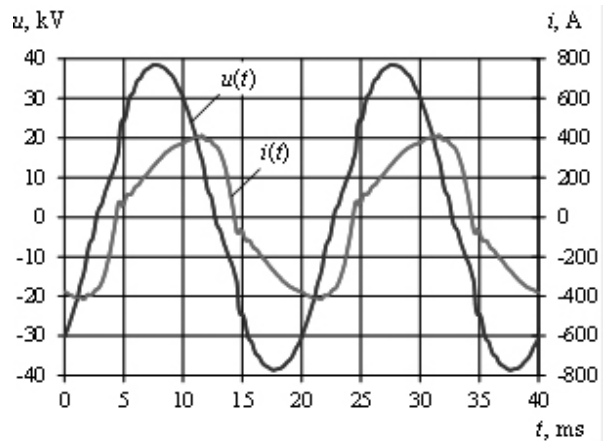


Fig. 7. Voltage and current waveforms in traction network

The RMS values may be evaluated by integration of waveform and discrete Fourier transform methods. So the conditions that used to check spectrum discreteness may be written as follows

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{k=1}^N U^{(k)^2}}, \quad (1)$$

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{k=1}^N I^{(k)^2}}, \quad (2)$$

where $u(t)$, $i(t)$ – instantaneous voltage and current; $U^{(k)}$, $I^{(k)}$ – voltage and current RMS harmonic value; T – fundamental harmonic period, $T = 0.02$ sec; N – number of harmonics in a discrete transform, $N = 40$.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

As can be seen from table 1 the conditions (1)-(2) are satisfied with 0.001% error. This means that we can consider that voltage and current spectrums consist from discrete harmonics with frequencies that multiples of the fundamental frequency.

Table 1

Voltage and current RMS comparing

Magnitude	Definition method		Error, %
	integration of waveform	discrete Fourier transform	
U, V	27 317.687	27 317.767	< 0.001
I, A	297.848	297.851	0.001

The relative spectrums of voltage and current at AC traction substation consist of odd harmonics (Fig. 8). The fundamental harmonics are shown not in scale. When spectrums of voltage and currents will be compared it can be seen that in current spectrum with frequency increasing the harmonics values are decreasing. But in voltage spectrum some harmonics are gained and some are weakened.

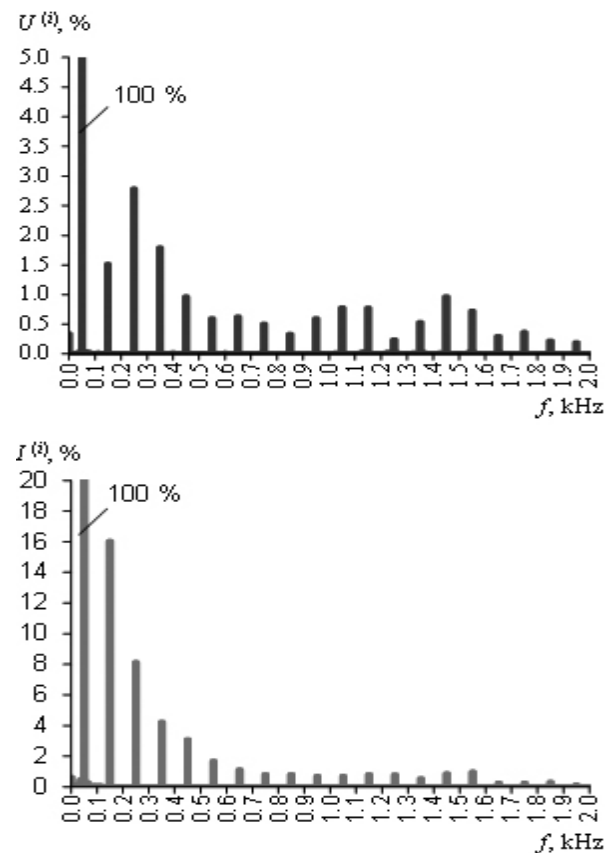


Fig. 8. Voltage and current relative spectrums

For example, in current spectrum the harmonic with a frequency of 150 Hz has a maximum. But in voltage spectrum the harmonic with maximum value has a frequency of 250 Hz. This indicates for non-linear resistance characteristics of traction network as a function of frequency.

Findings

Using these spectra, we can calculate the components of the balance of the total power in an AC circuit. Notable is the fact that the flows of active and reactive power of the higher harmonics are directed opposite power of the fundamental harmonic (Fig. 9).

This suggests that the AC electric rolling stock is a load at the fundamental frequency and a noise generator on the higher harmonics.

In percentage terms power flows on higher harmonics are less than 1 % and create more disturbing impact on related communication devices, automation and remote control than the effect of the losses increasing.

The results of power components evaluation showed as keeping the balance in the quadrature components of active power P , reactive power of the 1st harmonic Q_1 and distortion power D (Fig. 10).

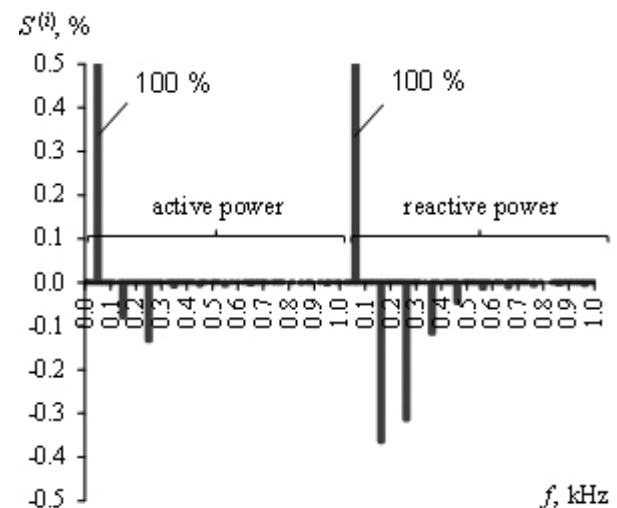


Fig. 9. Active and reactive power spectrums

In calculations the total power was determined by the product of the RMS values of current and voltage.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

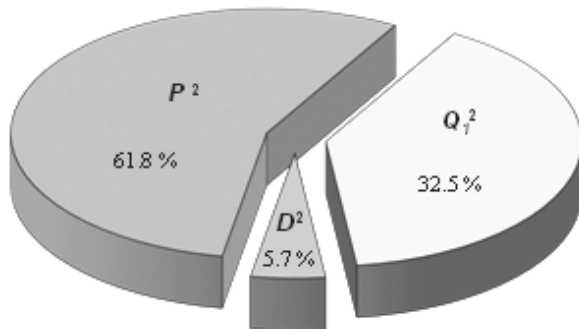


Fig. 10. Power balance in the quadrature components

The obtained result shows that the total power consists of 61.8% of the active power, 32.5% of the reactive power of the 1st harmonic and 5.7% of the distortion power in the quadrature components.

Originality and Practical value

The voltage and current spectrums at AC traction substation may be considered as spectrums that consist from discrete harmonics with frequencies that multiples of the fundamental frequency.

The AC electric rolling stock is a noise generator on the higher harmonics because the flows of active and reactive power of the higher harmonics are directed opposite power of the fundamental harmonic.

Analysis of the quadrature components suggests that traditional approaches to reactive power compensation at the fundamental frequency will be sufficiently effective. But the influence of the distortion power on reducing energy losses must be also researched. Besides reactive power compensation should be considered with the issue of reducing the basic power quality indices to standardized values.

Conclusions

1. The most significant power quality indices at AC traction substation are voltage deviation, voltage unbalance and harmonic distortion.

2. Voltages at the connection points of traction substations to supply lines are complex stationary random process that determines the voltage mode of the external power supply system of each traction substation.

3. Voltage waveform distortions according to standard requirements are below norm only for primary networks. On the other connection the dis-

turbances are outside the allowable range. The situation is similar for the voltage unbalance.

4. The flows of active and reactive power of the higher harmonics at AC traction substation are directed opposite power of the fundamental harmonic. The power flows on higher harmonics create the disturbing impact on related devices.

5. The total power at AC traction substation consists of 61.8% of the active power, 32.5% of the reactive power of the 1st harmonic and 5.7% of the distortion power in the quadrature components.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер. – М. : УМК МПС РФ, 2002. – 638 с.
2. Босий, Д. О. Оптимізація керування регульованою компенсацією реактивної потужності на тягових підстанціях змінного струму / Д. О. Босий // Інформ.-керуючі системи на заліз. трансп. – 2010. – № 1. – С. 24–32.
3. Босий, Д. О. Математичне моделювання електротягового навантаження в задачах вивчення електромагнітних процесів для систем електропостачання електричного транспорту змінного струму / Д. О. Босий, В. Г. Сиченко // Техн. електродинаміка, тематичний вип. – 2009. – Ч. 3. – С. 86–89.
4. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. – Введ. 1999.01.01. – К. : Госстандарт Украины, 1999. – 35 с.
5. Контроль потребления электроэнергии с учетом ее качества / О. Г. Гриб, В. И. Васильченко, Г. А. Сендерович и др. ; под ред. О. Г. Гриба. – Х. : ХНУРЭ, 2010. – 444 с.
6. Кузнецов, В. Г. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения / В. Г. Кузнецов, Э. Г. Куренный, А. П. Лютый. – Донецк : Донбасс, 2005. – 249 с.
7. Марквардт, К. Г. Энергоснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М. : Транспорт, 1982. – 528 с.
8. Полях, О. М. Застосування матриць та графів до розрахунку систем електропостачання / О. М. Полях // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 42. – С. 133–137.
9. Сиченко, В. Г. Аналіз режимів напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму / В. Г. Сиченко, Д. О. Босий // Вісник

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

- Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 29. – С. 82–87.
10. Электромагнитная совместимость потребителей / И. В. Жежеленко, А. К. Шидловский, Г. Г. Пивняк и др. – М. : Машиностроение, 2012. – 351 с.
 11. A Comparative Study of Signal Processing and Pattern Recognition Approach for Power Quality Disturbance Classification / B. K. Panigrahi, S. K. Sinha, A. Mohapatra et al. // IETE Journal of Research. – 2011. – № 57. – P. 5–11.
 12. Arrillaga, J. Power System Harmonics / J. Arrillaga, N. R. Watson. – New York : John Wiley & Sons, 2004. – 399 p.
 13. Bollen, M. H. J. Signal Processing of Power Quality Disturbances / M. H. J. Bollen, I. Y. H. Gu. – Piscataway : NJ, IEEE Press, 2006. – 861 p.
 14. Impedances of contact lines and propagation of current harmonics / A. Zynovchenko, Xie Jian, J. Steffen, K. Franz // Elektrische Bahnen. – 2006. – № 5. – P. 12–17.
 15. Sutherland, P. E. System impacts evaluation of a single-phase traction load on a 115 kV transmission system / P. E. Sutherland, M. Waclawiak, M. F. McGranaghan // IEEE Transactions on power delivery. – 2006. – Vol. 21, № 2. – P. 837–843.

Д. О. БОСИЙ^{1*}

^{1*}Каф. «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (050) 698 23 95, ел. пошта dake@i.ua

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЯХ ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета. На тягових підстанціях змінного струму застосовуються триобмоткові трансформатори. Така схема живлення призводить до значних спотворень показників якості електроенергії в кожного споживача, який живиться від тягової підстанції. Найбільш важливими показниками якості для тягових підстанцій змінного струму є відхилення, несиметрія та гармонійні спотворення напруги. Метою цієї роботи є комплексна оцінка показників якості електроенергії двох тягових підстанцій, які паралельно працюють на одну міжпідстанційну зону. **Методика.** Вимірювання показників якості виконані відповідно до програми протягом 24 годин з дискретизацією в часі 1 с. Застосовано декілька аналізаторів потужності РМ175 із синхронізацією в часі. Вимірювальні прилади підключались через відповідні трансформатори напруги і струму на кожному рівні напруги. **Результати.** Рівень напруги на різних підстанціях відрізняється через втрати потужності в первинній мережі. Крім того, напруга в одній фазі мережі більша, ніж у інших фазах. Гармонійні спотворення напруги можуть бути менші норми, встановленої стандартом, лише для первинної мережі 154 кВ. Для інших – тягової та районної мережі – вони перевищують встановлені норми. Несиметрія напруги в мережі 154 кВ нижча, ніж у районній мережі 35 кВ. Крім того, рівень несиметрії в первинній мережі відповідає вимогам стандарту. У той же час можна вважати, що спектри напруги і струму містять дискретні гармонійні складові, частоти яких кратні основній частоті мережі. **Наукова новизна.** Напруги в точках приєднання тягових підстанцій до живильної мережі являють собою складний стаціонарний випадковий процес, який визначає режим напруги системи зовнішнього електропостачання кожної тягової підстанції. Потоки активної та реактивної потужностей на вищих гармоніках спрямовані протилежно потокам потужностей на основній гармоніці. Потоки потужностей на вищих гармоніках створюють перешкоджаючий вплив на суміжні пристрої. Повна потужність тягової підстанції змінного струму складається на 61,8 % з активної, 32,5 % з реактивної 1-ї гармоніки і 5,7 % потужності спотворення у квадратурних складових. **Практична значимість.** Аналіз квадратурних складових вказує на те, що застосування традиційної компенсації реактивної потужності на основній частоті буде достатньо ефективним. Проте необхідно враховувати вплив потужності спотворень на зниження втрат електроенергії. Крім того, компенсацію реактивної потужності необхідно застосовувати як спосіб зниження основних показників якості електроенергії до нормованих значень.

Ключові слова: якість електроенергії; змінний струм; трифазна система; тягова підстанція; вимірювання; гармоніка; спотворення; несиметрія; потоки потужностей

Д. А. БОСЬЙ^{1*}

^{1*}Каф. «Електроснабження залізничних доріг», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (050) 698 23 95, ел. пошта dake@i.ua

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель. На тяговых подстанциях переменного тока применяются трехобмоточные трансформаторы. Такая схема питания приводит к значительным искажениям показателей качества электроэнергии у каждого потребителя, который питается от тяговой подстанции. Для тяговых подстанций переменного тока наиболее важными показателями качества электроэнергии являются отклонения, несимметрия и гармонические искажения напряжения. Цель данной работы состоит в комплексной оценке показателей качества электроэнергии для двух тяговых подстанций, которые параллельно работают на одну межподстанционную зону. **Методика.** Измерения показателей качества выполнены в соответствии с программой на протяжении 24 часов с дискретизацией во времени 1 с. Применено несколько анализаторов мощности РМ175 с синхронизацией времени. Измерительные приборы подключались через соответствующие трансформаторы напряжения и тока на каждом уровне напряжения. **Результаты.** Уровень напряжения на разных подстанциях отличается ввиду потерь мощности в первичной сети. Кроме того, напряжение в одной фазе больше, чем в остальных фазах. Гармонические искажения могут быть ниже нормы, установленной стандартом, только для первичной сети 154 кВ. Для других – тяговой и районной сетей – гармонические искажения превышают установленные нормы. Несимметрия напряжений в сети 154 кВ ниже, чем в районной сети 35 кВ. Кроме того, уровень несимметрии в первичной сети соответствует требованиям стандарта. В то же время можно считать, что спектры напряжения и тока содержат дискретные гармонические составляющие, частоты которых кратны основной частоте сети. **Научная новизна.** Напряжения в точках присоединения тяговых подстанций к питающей сети представляют собой сложный стационарный случайный процесс, который определяет режим напряжения системы внешнего электроснабжения каждой тяговой подстанции. Потoki активной и реактивной мощностей на высших гармониках направлены противоположно потокам мощностей на основной гармонике. Потoki мощностей на высших гармониках создают мешающее влияние на смежные устройства. Полная мощность тяговой подстанции переменного тока состоит на 61,8 % из активной, 32,5 % из реактивной 1-й гармоники и 5,7 % мощности искажений в квадратурных составляющих. **Практическая значимость.** Анализ квадратурных составляющих указывает на то, что применение традиционной компенсации реактивной мощности на основной частоте будет достаточно эффективным. Но также необходимо учесть влияние мощности искажений на общее снижение потерь электроэнергии. Кроме того, компенсацию реактивной мощности необходимо применять как способ снижения основных показателей качества электроэнергии до нормируемых значений.

Ключевые слова: качество электроэнергии; переменный ток; трехфазная система; тяговая подстанция; измерения; гармоника; искажения; несимметрия; потоки мощностей

REFERENCES

1. Bader M.P. *Elektromagnitnaya sovместimost* [Electromagnetic compatibility]. Moscow, UMK MPS RF Publ., 2002. 638 p.
2. Bosiy D.O. Optimizatsiia keruvannia rehulovanoi kompensatsiiei reaktivnoi potuzhnosti na tiahovykh pidstantsiakh zminnoho strumu [Optimizing the controlled compensation of reactive power at the AC traction substations]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti – Information and control systems on railway transport*, 2010, no. 1, pp. 24-32.
3. Bosiy D.O., Sichenko V. G. Matematychni modeliuvannia elektrotiahovoho navantazhennia v zadachakh vyvchennia elektromahnitnykh protsesiv dlia system elektropostachannia elektrychnoho transportu zminnoho strumu [Mathematical modeling of electric traction load in tasks of electromagnetic processes studying for AC electric traction power systems]. *Tekhnichna elektrodinamika, tematychnyi vypusk – Technical electrodynamics, Special issue*, 2009, part 3, pp. 86-69.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

4. GOST 13109-97. *Elektricheskaya energiya. Trebovaniya k kachestvu elektricheskoy energii v setyakh obshchego naznacheniya* [Electrical energy. Power quality requirements for electrical energy in electric utility networks]. Kiev, Gosstandart Ukrainy Publ., 1999. 35 p.
5. Grib O.G., Vasilchenko V.I., Gromadskiy Yu.S., Dovgalyuk O.N., Manov I.A., Rozhkov P.P., Sapryka V.A., Senderovich G.A., Shcherbakova P.G. *Kontrol potrebleniya elektroenergii s uchetom yeye kachestva* [Electric energy consumption control taking into account its quality]. Kharkov, KhNURE Publ., 2010. 444 p.
6. Kuznetsov V.G., Kurennyy E.G., Lyuty A.P. *Elektromagnitnaya sovmestimost. Nesimmetriya i nesinusoidalnost napryazheniya* [Electromagnetic compatibility. Voltage unbalance and harmonic distortion]. Donetsk, Donbass Publ., 2005. 249 p.
7. Markvardt K.G. *Energosnabzheniye elektrifitsirovannykh zheleznikh dorog* [Power supply of electric railways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 528 p.
8. Poliakh O.M. Zastosuvannya matryts ta hrafiv do rozrakhunku system elektropostachannia [Using the matrices and graphs for power systems evaluating]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp. 133-137.
9. Sychenko V.H., Bosyi D.O. Analiz rezhymiv napruhy na pryednanniakh tiahovykh pidstantsii zminnoho strumu [The mode of voltage analysis at AC traction substations]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 29, pp. 82-87.
10. Zhezhelenko I.V., Shidlovskiy A.K., Pivnyak G.G., Sayenko Yu. L., Noyberger N.A. *Elektromagnitnaya sovmestimost potrebiteley* [Electromagnetic compatibility of power consumers]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2012. 351 p.
11. Panigrahi B.K., Sinha S.K., Mohapatra A., Dash P., Mallick M.K. A Comparative Study of Signal Processing and Pattern Recognition Approach for Power Quality Disturbance Classification. *IETE Journal of Research*, 2011, no. 57, pp. 5-11.
12. Arrillaga J., Watson N.R. *Power System Harmonics*. New York, John Wiley & Sons Publ., 2004, 399 p.
13. Bollen M.H.J., Gu I.Y.H. *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. Piscataway, NJ, IEEE Press Publ., 2006. 861 p.
14. Zynovchenko Andriy, Xie Jian, Jank Steffen, Klier Franz. Impedances of contact lines and propagation of current harmonics. *Elektrische Bahnen*, 2006, no. 5, pp. 12-17.
15. Sutherland P.E., Waclawiak M., McGranaghan M.F. System impacts evaluation of a single-phase traction load on a 115 kV transmission system. *IEEE Transactions on power delivery*, 2006, vol. 21, no. 2, pp. 837-843.

D. Sc. (Phys.&Math), Prof. V. I. Gavrilyuk (Ukraine); D. Sc. (Tech.), Prof. S. P. Denisyuk (Ukraine) recommended this article to be published.

Received Jun. 04, 2013

Accepted Aug. 06, 2013