



ANALYSIS OF IMPROVING THE QUALITY OF ELECTRIC POWER SUPPLY OF THE METROPOLITAN

Gultakin Hasanova¹, İlqar Aliyev²

^{1,2}Azerbaijan State Oil and Industry University

^{1,2}Department of Electrical Power Engineering”, ^{1,2}Lecturer

E-mail: ¹gultakin.hasanova@asoiu.edu.az, ²aliyevilqar674@mail.ru

ABSTRACT

This article addresses issues related to voltage quality and reactive power compensation aimed at increasing the electric power supply capacity of metropolitan areas. Reactive power compensation contributes to reducing power losses, increasing the transmission capacity of the electrical network, and enabling voltage regulation through the use of compensating devices. The generation of high harmonics in traction substations leads to additional losses and voltage pulsations. At present, due to rising electricity costs, reducing operational losses has become a primary and urgent challenge requiring effective solutions. In this context, recent efforts have focused on the application of new types of rectifiers, active power filters, and inverters to reduce losses in the traction network. Reactive power compensation and active filtering of harmonic components help extend the service life of expensive equipment, provide additional active power to connect new loads, and reduce the risks of malfunctions, accidents, and energy costs. A hybrid reactive power compensator can also be employed in the metro power supply system for reactive power compensation. It enables stepwise adjustment of phase current relative to phase voltage and mitigates high-frequency distortions. As a result, the power factor is improved by reducing the phase shift between current and voltage, while also smoothing harmonic distortions. One of the most effective ways to increase voltage levels in metro traction networks is through the modernization of traction substations using 12-pulse rectifiers. The use of 12-pulse rectifiers improves the power factor of the traction substation, enhances the waveform of the input current, improves power quality, and raises the level of rectified voltage without the need for additional voltage regulation devices. This article provides an in-depth analysis of the effects of reactive power on losses in the metropolitan power supply system, highlighting key issues such as the phase shift between current and voltage and the presence of high-frequency distortions. A comparative analysis of available filters shows that active power filters are the most practical solution. It is noteworthy that the load current waveform, when high harmonics are present, can differ from the fundamental harmonic by up to 96%. When active power filters are employed, the phase current waveform is accurately corrected, resulting in an increased Current Utilization Coefficient (CUC). In this case, approximately 56% of the reactive current is compensated, and harmonic distortion is reduced to less than 1%.

Keywords: voltage quality, reactive power, compensation devices, electrical equipment, harmonics, metro.

METROPOLITENİN ELEKTRİK ENERJİ TƏMINATININ KEYFİYYƏTİNİN YÜKSƏLDİLMƏSİNİN ANALIZI

Gültəkin Həsənova¹, İlqar Əliyev²

^{1,2}Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti

^{1,2}“Elektroenergetika kafedrası”, ^{1,2}Müəllim

E-mail: gultakin.hasanova@asoiu.edu.az, ²aliyevilqar674@mail.ru



XÜLASƏ

Məqalə metropolitenin elektrik enerji təminatının yüksəldilməsi məqsədilə gərginliyin keyfiyyəti və reaktiv gücün kompensasiyası məsələlərinə həsr olunmuşdur. Reaktiv gücün kompensasiya olunması itkilərin azalmasına, elektrik şəbəkəsinin ötürmə qabiliyyətinin artmasına və kompensasiyaedici qurğulardan istifadə edilməsi gərginliyin tənzimlənməsinə şərait yaradır. Reaktiv gücün kompensasiyası və harmonik mürəkkəbələrin aktiv şəkildə filtrasiyası bahalı avadanlıqların işləmə müddətinin uzadılmasına, yeni yüklərin qoşulması zamanı əlavə aktiv gücün yaranmasına, səhvən işləmə risklərinin, qəzaların və eləcə də elektik enerjisi xərclərinin azaldılmasına səbəb olur. Metropolitenin enerji təchizatı sistemində reaktiv gücü kompensasiya etmək üçün hibrid reaktiv güc kompensatorundan istifadə faza cərəyanının, faz gərginliyinə nisbətən dəyişməsinə və yüksək tezlikli təhrifləri mərhələlərlə tənzimləməyə imkan verir. Nəticədə, cərəyan və gərginlik arasındakı sürüşməni azaltmaqla yanaşı, harmonik güc təhriflərini hamarlaşdırmaqla gücəmsalını artır. Dartı yarımstansiyasında yüksək harmonikaların yaranması əlavə itkilərə və gərginlik döyümlərinə səbəb olur. Müasir dövrdə elektrik enerjisinin bahalaşması fonunda istismar zamanı itkilərin azaldılması effektiv həllini gözləyən ən aktual məsələdir. Bununla əlaqədar olaraq son illərdə yeni növ düzləndiricilərin, aktiv güc filtrlərinin, invertorların tətbiqi dartı şəbəkəsində itkilərin azaldılmasına hesablanıb. Metropolitenin elektrik enerjisi ilə təminatının keyfiyyətinin yüksəldilməsi üçün dartı yarımstansiyalarında 12 pulslu düzləndiricilərin tətbiqi ən effektiv vasitədir.

Açar sözlər: gərginliyin keyfiyyəti, reaktiv güc, kompensasiya qurğuları, elektrik avadanlıqları, harmonikalar, metropoliten, düzləndirici.

Giriş

Metro stansiyaları daha az enerji istehlakı ilə daha çox səmərəni daşıya bilməsinə görə, avtobus və avtomobil xidmətləri ilə müqayisədə nəqliyyatın yaşıl növü hesab olunur. Metropolitenə enerji istehlakı əsasən qatarların hərəkətə gətirilməsinə, kondisioner, eskalator, işıqlandırma sistemə sərf olunur. Bundan əlavə metro dəyişkən yüklər ilə işləyən və elektrik istehlakçılarının keyfiyyətinə əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərən çoxsaylı nasos və kompressor elektrik mühərriklərinə malikdir. Buna görə, elektrik qurğularında böyük elektrik mühərriklərinin və metro elektrik təchizatı sistemindəki istehlakçıların öz-özünə qoşulması ilə bağlı məsələlərə xüsusi diqqət yetirmək lazımdır. Metropolitenin elektrik enerji təminatı 3 növ yarımstansiya vasitəsilə həyata keçirilir:

- Üç fazlı alçaldıcı transformatorlardan və düzləndiricilərdən (dəyişən cərəyanı sabit cərəyan çevirən) ibarət olan 6/10/20 kV-luq dartı yarımstansiyaları.

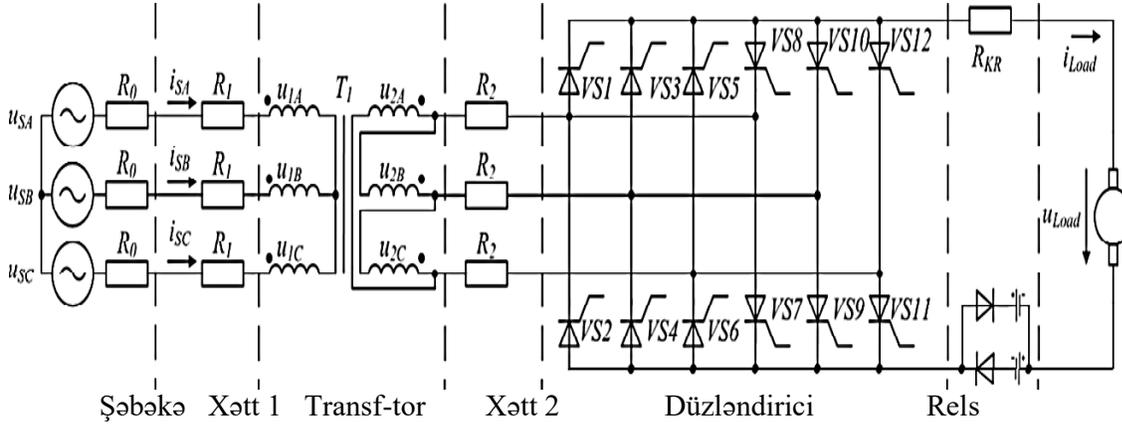
- Alçaldıcı yarımstansiya (AY) 6/10/ kV dəyişən cərəyan gərginliyini alçaldıcı transformatorlar vasitəsilə alçaldaraq metropolitenin xüsusi sərfiyyatına - işıqlanmasına, eskalatorlara, ventilyasiya, siqnalizasiya və nasos sistemə sərf olunur.

- Dartı-alçaldıcı yarımstansiya

Hərəkət qatarlarının elektrik enerji təchizatı Dartı Yarımstansiyası (DYS) tərəfindən həyata keçirilir. DYS-nin əsas avadanlıqları üç fazlı transformatorlardan, yüksək gərginlik açarlarından, düzləndiricilərdən ibarətdir. Qatarların qidalanması üçün 6/10/20 kV gərginlikli 3 fazlı dəyişən cərəyan 825 V sabit cərəyanə çevrilir. Elektrik enerjisinin bir hissəsi isə 10 kV gərginlikdə alçaldıcı yarımstansiya otürülür.

Məqsəd

Metronun elektrik təchizatı sisteminin yenilənməsinin istiqamətlərindən biri 12 pulslu düzləndiricilərin (Şək. 1) dartı yarımstansiyalarında tətbiqi ilə bağlıdır.



Şəkil 1.12 pulslu düzləndiricinin sxemi

Dartı elektrik təchizatı sistemində yeni elektrotexniki avadanlığın tətbiqi zamanı elektrik səmərəliliyinin artırılması, dartı şəbəkəsində enerjinin keyfiyyəti və qatarların hərəkətinin təhlükəsizliyinin təmin edilməsi sistemlərinin etibarlılığının artırılması, sürətin tənzimlənməsi vacib məsələlərdəndir. Metropolitenin elektrik təchizatı sisteminin harmonik tərkib hissələrinin yaranmasının əsas səbəbləri düzləndiricilərin dartı yarımstansiyalarındakı və elektrik qatarlarının hərəkəti ilə bağlıdır. Elektrik hərəkət qatarları dartı yarımstansiyasındakı cərəyanların harmonik tərkib hissələrində döyünlərə səbəb olur ki bu da qatarın hərəkətinin təhlükəsizliyinin təmin edən qurğuların normal işinə mane olur. Metropolitenin dartı yüklərinin qidalanmasında elektrik enerjisinin keyfiyyətinin əsas göstəricilərinin yaxşılaşdırılması əsasən nominal gərginlik səviyyəsinin təmin edilməsinə və dartı cərəyanının yüksək harmonik tərkib hissələrinin azalmasına gətirib çıxarır.

Metropolitenin dartı şəbəkəsində gərginlik səviyyəsinin yüksəldilməsi məqsədlə ən effektiv vasitə 12 pulslu düzləndiricilərdən istifadə etməklə dartı yarımstansiyasının modernləşdirilməsidir. 12 pulslu düzləndiricilərdən istifadə dartı yarımstansiyasının güc əmsalını yüksəltməyə; ilkin cərəyan əyrisinin formasını yaxşılaşdırmağa, elektrik enerjisinin keyfiyyətini yüksəltməyə; düzləndirilmiş gərginliyin keyfiyyətini artırmağa və gərginlik tənzimləmə qurğuları tətbiq edilmədən dartı şəbəkəsində gərginlik səviyyəsini yüksəltməyə imkan verir.

Kompensasiya qurğularının olmaması, gərginlik döyünlərinin demək olar ki, 13% - ə çatması və tənzimlənen reaktiv güc mənbələri olduqda isə əsasən 5% - ə qədər olması müəyyən edilmişdir. Bu döyünlər, mühərriklərin yük dalğalanma tezliyinə (0,1-0,5 Hz) yaxın olan aşağı tezlikli harmoniklərin üstünlüyə malik olması spektrində mürəkkəb xarakter daşıyır və bununla yanaşı bəzi qrafiklərdə nisbətən yüksək tezlikli harmoniklərin (1-9 Hz) olması müşahidə olunur.

Kompensasiya qurğularının olması zamanı, metropolitenin enerji təchizatı sistemindəki aktiv və reaktiv güc itkiləri təxminən 2-2, 5 dəfə azalır ki, bu da mühərriklərdəki gərginliyin artması və elektrik intiqalının dayanıqlığı üçün gərginliyin döyünməsi ilə izah olunur. Beləliklə, hesablamalar göstərir ki, gərginlik döyünlərinin hər faizi dayanıqlıq həddini 3-5% azaldır və nəticədə ən çox tezlik ilə üst-üstə düşən, valdakı yük döyünləri ilə əks fazada olan gərginlik döyünlərinin dayanıqlığına təsir göstərir.

Metrolar

Gərginliyi bir kilovoltadək olan bəzi istehlakçılar elektrik enerjisinin keyfiyyətinə həsas olduğundan metroda 1 kv-a qədər və 1 kv-dan yuxarı istehlakçılar üçün (6 kV gərginliyə) hər stansiyada 6/0.4 kV tam yarımstansiya quraşdırılmışdır. Elektrik enerjisinin yarımstansiyadan nasos və kompressor qurğularına ötürülməsi magistral kabellərdən istifadə etməklə həyata keçirilir. Stansiyalar arasındakı məsafədən asılı olaraq hər yarımstansiyadan ayrı-ayrı qurğuları qidalandırmaq üçün magistral xətlər

ayrılır. Avadanlıqların bu cür yerləşdirilməsi ilə gərginliyin dəyişikliyi elektrik intiqalının rejiminə və dayanıqlığına əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərir.

Sabit cərəyan şəbəkələrində gərginlik və tezliyin döyünməsi, həmçinin əyri formasının qeyri-sinusoidalığı, bir fazalı cərəyan şəbəkələrində normallaşdırılır. Keyfiyyət göstəricilərinin dəyərləri $\beta \leq 0,96$ ehtimalını aşmamalıdır. Verilən həddlərə görə Y_i göstəricisinin dəyişməsi bu həddlərdə olmalıdır:

$$\beta[Y_{imin} \leq Y_i \leq Y_{imax}] \leq 0,96 \quad (1)$$

Tezliyin dəyişməsi zamanı onun nominal göstəricisi ilə verilmiş göstərici arasındakı fərq $\pm 1Hs$ ilə məhdudlaşdırılmalıdır. Normal işə salma və idarəetmə şərtlərinə görə, elektrik mühərrikləri və cihazlarının sıxaclarında nominal gərginliklə buaxıla bilən yayınma həddi $0,2 Hs$ ilə məhdudlaşan tezlik dalğalanmaları $-0,5 - 10\%$ arasında olmalıdır. Sürəti saniyədə nominal gərginliyin ən azı yüzdə biri olan gərginlik dəyişiklikləri dalğalanma (döyünmə) kateqoriyasına aiddir. Dispetçer idarəetməsində istifadə olunan cihazlar üçün icazə verilən gərginlik dalğalanmaları aşağıdakı ifadə ilə hesablanacaqdır:

$$K_i = 1 + \frac{z}{n} = 1 + \frac{\Delta U}{60} \quad (2)$$

Burada n və ΔU bir saatda döyünmənin sayı və 60 dəqiqə ərzində hesablanmış döyüntülər arasındakı orta intervaldır.

Kəskin dəyişkən yükə malik elektrik istehlakçıları üçün gərginlik dalğalanmaları təkrarlanma tezliyinin nominal dəyərinin $1,5\%$ - i ilə məhdudlaşır. Digər elektrik tələbatçılarının sıxaclarında gərginlik dalğalanmaları isə normallaşdırılmamışdır.

Geyri simmetrik gərginlik, əks ardıcılıqlı U_2 gərginliyinin şəbəkənin U_n nominal gərginliyinə olan nisbəti ilə xarakterizə olunur, bu halda qeyri-simmetriklik əmsalı aşağıdakı kimi olacaqdır:

$$K_{q/s} = \frac{U_2}{U_n} \cdot 100 \quad (3)$$

İstənilən üçfazlı simmetrik tələbatçının sıxaclarındakı qeri simmetriklik əmsalının $K_{q/s} \leq 1,5\%$ həddində olması qəbul ediləndir.

Gərginliyin qeyri-sinusoidalığı qeyri-sinusoidalıq əmsalı ilə təyin olunur:

$$K_{q.sin} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1.5}^{\infty} U_i}}{U_n} \cdot 100 \quad (4)$$

Burada U_i i -ci harmonikanın aktiv göstəricisidir.

Düzləndilmiş gərginliyin keyfiyyəti dalğalanma əmsalı D ilə qiymətləndirilir, düzləndilmiş gərginliyin bütün harmoniklərinin aktiv göstəricisinin müvafiq düzləndilmiş gərginliyin göstəricisinə bərabər nisbəti belə təyin olunur:

$$D = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} U_i}}{U_0} \quad (5)$$

Burada U_i düzləndirilmiş gərginliyin harmonikasını, U_0 isə düzləndirilmiş gərginlik sabitidir.

Beləliklə, metropolitenin elektrik istehlakçıları şəbəkədən aktiv və reaktiv güc istehlak etdikləri üçün onların göstəriciləri nəzərə alınmalıdır.

İşlədicilərin aktiv yüklərinin hesablanması üçün metro istehlakçılarının texnoloji parametrləri ilə enerji istehlakı təşkil edir (6).

$$P_{max} = K_{max} \cdot P_{or} \quad (6)$$

Burada K_{max} – elektrik tələbatçılarının maksimum əmsalı, P_{or} – tələbatçılardan orta yükü Hesabi aktiv yükü, həmçinin aşağıdakı kimi də göstərmək olar;

$$P_{hes.} = K_t \cdot P_{nom} \quad (7)$$

P_{nom} – elektrik mühərriklərinin təyin edilmiş gücü ,
 K_t – aktiv yüklərin təyin edilmiş tələb əmsalındır və bu ifadə ilə göstərilir:

$$K_c = \alpha + \frac{\beta}{\sqrt{\Pi_{ef}}} \quad (8)$$

α və β hesablama əmsallarının göstəriciləri Cədvəl 1-də göstərilmişdir.

Cədvəl 1. α və β hesablama əmsallarının göstəriciləri

Tələbatçılar	Aktiv yüklərin hesabı		
	α	β	K_{or}
Nasos stansiyaları	0,55	0,30	0,4 ÷ 0,5
Kompressor stansiyaları	0,75	0,2	0,7 ÷ 0,8

Hesablamayı daha dəqiq olmasına görə reaktiv gücün kompensasiyası zamanı seçilmiş variantların səmərəliliyini artırmaq üçün reaktiv yüklərin təyini birbaşa hesablama metodu ilə aparılmalıdır:

$$Q_P = 1.05 K_{U,P} Q_N \quad (9)$$

$K_{U,P}$ – reaktiv güc üçün istifadə əmsalı ; Q_N – eyni növ elektrik tələbatçılarının nominal reaktiv gücü
Gücü 5 kVt –dan 100 kVt-a qədər olan asinxron mühərriklərin reaktiv gücü və istifadə əmsalı belə ifadə olunur;

$$Q_N = 0.55 P_N + 1.5 n \quad (10)$$

$$K_{U,P} = a K_d + b K_U \quad (11)$$

Burada n – mühərriklərin sayı, a və b – hesablama əmsalları, K_d – qoşulma əmsalı, əksər sənaye elektrik tələbatçıları üçün eynidir.

Nəticə

Eksperimental nəticələr göstərdi ki, düzləndirilmiş gərginliyin göstəriciləri 12-pulslu düzləndiricilərdə 6-pulslu düzləndiricilərdən daha yaxşıdır. Belə ki, 6-pulse düzləndiricilərdə gərginliyin döyünmə diapazonu 100V, 12-pulslu düzləndiricilərdə isə 25 V olmuşdur. 12-pulslu düzləndiricilərdə düzləndirilmiş gərginliyin səviyyəsinin və sabitləşməsinin artımı 3-7% təşkil edir ki, bu da dartı yarımstansiyasında elektrik enerjisinə 5-12% qənaət edir. 12 pulslu düzləndiricilərin tətbiqi orta hesabla gün ərzində dartı yarımstansiyasının güc əmsalını 0,5-3% artırmaqla, bu zaman ilkin sistemdən istehlak edilən reaktiv gücün həcmi 4-8% aşağı düşə bilər. Beləliklə 6-pulslu düzləndiricilərdən 12-pulslu düzləndiricilərə keçid ,güç əmsalını 0,972-dan 0,977-ə qədər artırmağa imkan verir. Həmçinin 12-pulslu düzləndiricilərin tətbiqi , güc transformatorlarında, və dartı şəbəkəsində elektrik enerjisi itkilərinin azalması hesabına düzləndiricinin f.i.ə. artmasına səbəb olur.

Ədəbiyyat

1. Gasanova G. "Application of a reversible converter in the traction power supply system of the metro" XV International Scientific and Technical Conference Russia, Penza, November 2021 Pp 116-119
2. Hasanova G. IDAP-2022: "Management of compensation of reactive energy in the electricity supply system of the Metro" IDAP-2022:International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium Turkiye, Malatya – 2022 pp182-189
3. Gamidov M., Gasanova G. Assessment of strategies for reducing traction energy consumption



- of subways // International Journal "Synergy of Sciences", St. Petersburg March 2021, No.57.
4. G. Hasanova U. "Investigation of automated dispatch management system for ensuring uninterrupted and reliable operation of Baku Metro" pp. 643 MSU-2019.
 5. Gasanova G.U., Iskenderova Z.A. "Ways to improve the power factor in the subway power supply system" International Journal "Synergy of Sciences" Russia, ct/616-620 2022-N76
 6. G. Hasanova "Increasing the efficiency of electric power supply of the Metro", "problems of Energy" -№4, 2021
 7. Afonso J. L., Aredes M., Watanabe E. H., Martins J. S., «Shunt active filter for power quality improvement», Electricity for a sustainable urban development : proc., the intern. conf., UIE 2000, Portugal, Lisboa, 1–4 Nov., pp. 683–691
 8. Andrey E., Petrov A., Nadezhda A. Logutenko, «The analysis of reactive power in metro». IFOST-2016: Mechatronics, Electrical Engineering and Power Electronics, Part 2, pp. 121-123, 2016engineering, Vol. 86, №2, pp. 72–78, 2015.
 9. Petrov A.A., Schurov N.I. Shtang A.A. «Povyshenie kachestva elektroenergii metropolitena» [Electricity quality improving in metro]-2016 с.80-87
 10. Nos O.V., Kharitonov S.A. A system to control power currents of ineffective instantaneous power compensation, Russian Electrical Engineering, Vol. 86, №2, pp. 72–78, 2015.

АНАЛИЗ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТРОПОЛИТЕНА

Гюльтакин Гасанова¹, Илгар Алиев²

^{1,2}Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности

^{1,2}Кафедра «Электроэнергетика», ^{1,2}Преподаватель

E-mail: ¹gultakin.hasanova@asoiu.edu.az, ²aliyevilqar674@mail.ru

РЕЗЮМЕ

Статья посвящена вопросам качества напряжения и компенсации реактивной мощности с целью повышения электроснабжения метрополитена. Компенсация реактивной мощности позволяет снизить потери, увеличить пропускную способность электрической сети, использовать компенсирующие устройства для регулирования напряжения. Образование высших гармоник в тяговой подстанции приводит к дополнительным потерям и пульсациям напряжения. В современный период на фоне роста стоимости электроэнергии снижение потерь при эксплуатации является основной и наиболее актуальной проблемой, ожидающей эффективного решения. В связи с этим в последние годы применение новых типов выпрямителей, активных фильтров мощности и инверторов направлено на снижение потерь в тяговой сети. Для компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения метрополитена может быть использован также гибридный компенсатор реактивной мощности. Он позволяет смещать фазный ток относительно фазного напряжения и ступенчато регулировать высокочастотные искажения. В результате коэффициент мощности увеличивается за счет уменьшения сдвига между током и напряжением, а также сглаживания гармонических искажений мощности.

Ключевые слова: качество напряжения, реактивная мощность, устройства компенсации, электрооборудование, гармоники, метрополитен.

Publishing history: 30.06.2025

Article received: 22.05.2025

Article accepted: 10.06.2025