

UOT 621.311

QEYRİ-XƏTTİ YÜKLÜ YÜKSƏK GƏRGİNLİKLİ ŞƏBƏKƏLƏRDƏ GÜC İTKİLƏRİNİN AZALDILMASI ÜSULLARININ TƏDQIQI

İsayeva T.M.

“Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti” PHŞ
Az1010, Bakı şəh., Azadlıq pr., 20
E-mail: tarana.isa@gmail.com

Xülasə. Məqalə qeyri-xətti yüklərin təsiri altında işləyən yüksək gərginlikli elektrik şəbəkələrində güc itkilərinin yaranma mexanizminin, onların dəqiq təyin edilməsi problemlərinin və azaldılması tədbirlərinin öyrənilməsinə həsr olunmuşdur. Qeyri-sinusoidal rejimlərdə əsas şəbəkə elementlərinin güc itkilərinin hesablanması üçün analitik ifadələr təqdim edilmişdir. Tədqiqat çərçivəsində elektrik qövs poladərilmə sobalarını qidalandıran yüksək gərginlikli yarımstansiyada aparılmış eksperimental ölçmələrin nəticələri təhlil edilmişdir. Ölçmələr zamanı elektrik ötürmə xəttinin hər iki ucunda aktiv və reaktiv gücün dəyişməsi yüksək dəqiqlikli ölçü cihazları vasitəsilə qeydə alınmışdır. Həmçinin, qövs sobasının müxtəlif iş rejimlərində transformator vasitəsilə yüksək gərginlikli şəbəkəyə qoşulmuş yüklərin cərəyan və gərginlik dalğalarının formaları araşdırılmışdır. İtkilərin azaldılması məqsədilə reaktiv gücün kompensasiyasına əsaslanan üsullar təklif edilmişdir. Belə ki, xətlərə kondensator batareyalarının qoşulması ilə sistemdəki reaktiv komponentlərin və harmonik təsirlərin müəyyən qədər kompensasiya olunması mümkündür.

Abstract. This article is dedicated to the study of the mechanisms behind power losses in high-voltage electrical networks operating under the influence of nonlinear loads, the challenges associated with their precise identification, and the measures for their reduction. Analytical expressions have been provided for calculating power losses in the main network elements under non-sinusoidal conditions. Within the framework of the research, the results of experimental measurements conducted at a high-voltage substation supplying electric arc steelmaking furnaces have been analyzed. During the measurements, variations in active and reactive power at both ends of the electrical transmission line were recorded using high-precision measuring devices. Additionally, the forms of current and voltage waveforms of the loads connected to the high-voltage network via transformers were investigated under various operating modes of the arc furnace. To reduce losses, methods based on the compensation of reactive power have been proposed. Specifically, it is possible to partially compensate for the reactive components and harmonic effects in the system by connecting capacitor banks to the lines.

Аннотация. Статья посвящена исследованию механизма возникновения потерь мощности, проблем их точного определения и мероприятий по их снижению в высоковольтных электрических сетях, работающих под воздействием нелинейных нагрузок. Представлены аналитические выражения для расчёта потерь мощности основных элементов сети в несинусоидальных режимах. В рамках исследования проведён анализ результатов экспериментальных измерений, выполненных на высоковольтной подстанции, питающей электродуговые сталеплавильные печи. В ходе измерений с использованием высокоточных приборов были зафиксированы изменения активной и реактивной мощности на обоих концах линии электропередачи. Кроме того, исследованы формы токовых и напряженческих волн нагрузок, подключённых к высоковольтной сети через трансформатор при различных режимах работы дуговой печи. В целях снижения потерь предложены методы, основанные на компенсации реактивной мощности. В

частности, подключение конденсаторных батарей к линиям позволяет частично компенсировать реактивные составляющие и гармонические воздействия в системе.

Açar sözlər: qeyri-xətti yüklər, yüksək gərginlikli şəbəkə, güc itkiləri, aktiv güc, reaktiv güc, harmoniklər, kompensasiya sistemləri

Ключевые слова: нелинейные нагрузки, высоковольтная сеть, потери мощности, активная мощность, реактивная мощность, гармоника, системы компенсации

Key words: nonlinear loads, high-voltage network, power losses, active power, reactive power, harmonics, compensation systems

Giriş. Müasir sənaye müəssisələrinin enerji təchizatı sistemlərində qeyri-xətti yüklərin payı getdikcə artır. Xüsusilə elektrik qövs poladərilmə sobaları, qaynaq qurğuları, impuls rejimdə işləyən çeviricilər və digər güc elektronika cihazları elektrik şəbəkələrində cərəyan və gərginliyin qeyri-sinusoidal formaya düşməsinə səbəb olur. Bu hal şəbəkə elementlərində- transformatorlarda, kabel və hava xətlərində, eləcə də ölçü sistemlərində əlavə güc itkilərinin yaranmasına gətirib çıxarır.

Qeyri-sinusoidal rejimdə baş verən enerji itkilərinin dəqiq hesablanması və azaldılması məsələsi enerji sistemlərinin iqtisadi və texniki səmərəliliyinin artırılması baxımından mühüm əhəmiyyət daşıyır. Mövcud ədəbiyyatda əsasən aşağı gərginlikli sistemlər üçün aparılan tədqiqatlar üstünlük təşkil edir, lakin yüksək gərginlikli sənaye şəbəkələrində bu problem hələ də kifayət qədər öyrənilməmiş qalır.

Bu məqalənin məqsədi yüksək gərginlikli şəbəkələrdə qeyri-xətti yüklərin təsiri altında yaranan güc itkilərinin təyin edilmə metodikasını təqdim etmək və eksperimental nəticələr əsasında onların azaldılması üçün effektiv yanaşmaları müəyyənləşdirməkdir.

Enerji qənaəti hazırda müasir dünyanın iqtisadi inkişafının prioritet istiqamətlərindən biridir. Enerji qənaəti problemlərinin aktuallığı, əsasən, sənaye istehsalının yüksək enerji intensivliyi ilə izah olunur. Bu səbəbdən sənaye elektrik şəbəkələrində enerji itkilərinin əhəmiyyətli dərəcədə azaldılması zəruridir.

Qeyri-xətti yüklər altında yüksək gərginlikli elektrik ötürmə xətlərində itkilərin öyrənilməsi və hesablanması məsələlərinə bir sıra elmi tədqiqatlar həsr olunmuşdur [3, 9]. Bu tədqiqatların analizindən məlum olur ki, onlar əsasən xəttin müxtəlif seqmentlərində, xüsusilə transformatorlarda, qeyri-sinusoidal rejimlərdə elektrik enerjisi itkilərinin təhlili və hesablanması metodlarının seçilməsi məsələlərini araşdırmış, həmçinin bu problemin həlli üçün müxtəlif yanaşmaları təhlil etmişlər. Belə ki, məqalədə qeyri-xətti yükləri təmin edən enerji transformatorları üçün güc itkilərinin hesablanması yanaşması təqdim edilmişdir [1, 7].

Qeyd etmək lazımdır ki, bu sahədə tədqiqatların sayının artmasına müvafiq ölçü cihazlarının və informasiya-ölçü sistemlərinin inkişafı səbəb olmuşdur. Bu sistemlər elektrik enerjisinin ölçülməsi və qeydiyyatı üçün geniş imkanlar yaradır və itkilərin daha dəqiq təyini üçün zəruri məlumat bazasını təmin edir.

Xəttin hər iki ucunda ölçülmüş aktiv güc fərqi əsasında hava xətlərində ümumi itkilərin müəyyən edilməsi mümkündür. Bunun üçün xətt üzrə ümumi aktiv gücün ölçülməsi üçün istifadə olunan kompleksin sisteməlik xətası təyin edilməlidir. Elektrik şəbəkəsində faktiki texniki itkilər isə çoxfunksiyalı enerji sayğacları və ayrı-ayrı şəbəkə elementlərinin modelləri əsasında hesablanaraq müəyyən edilə bilər [8].

Enerji itkiləri əsasən rezistiv, tutum və induktiv itkilərdən ibarət olur. Bundan əlavə, texniki itkilər, tac itkisi, sızma cərəyanı və dielektrik itkilər də mövcuddur. Yüksək gərginlikli hava xətlərində aktiv gücün ümumi itkiləri elektrik veriliş xəttinin sonundakı rejim parametrlərinə və parametrlərin paylanmasına əsaslanaraq müəyyən oluna bilər [7]. Transformatorlarda itkilərin hesablanması isə, əgər bu itkilər transformatorun nominal gücünə nisbət olaraq göstərilirsə, enerji ölçən cihazlar vasitəsilə aparılır. Bu yanaşma, transformatorlarda və xətlərdə baş verən güc

itkilərinin dəqiq təyini üçün əsas metodlardan biridir və enerji səmərəliliyinin artırılması, həmçinin sistemin etibarlılığının yüksəldilməsi baxımından mühüm əhəmiyyət kəsb edir.

Əsas hissə. Elektrik enerjisini ölçən sayğaclarla hesablamaları həyata keçirən funksiyalar şəbəkə modelinə əsaslanır. Müasir elektrik sayğacları yalnız enerji qeydiyyatı ilə kifayətlənmir, həm də bir sıra əlavə funksiyaları yerinə yetirə bilər. Xüsusilə ağıllı elektrik ölçmə sistemlərinə sayğacların quraşdırılması zamanı, onlara “itkiləri hesablama” funksiyasının verilməsi və bu funksiyanın praktiki dəqiqliklə həyata keçirilməsi vacibdir. Belə funksiyaların bir qismi mikropesessor əsaslı elektrik sayğacları ilə təyin edilir. Bu yanaşma enerji itkilərinin xətt üzrə dəqiq təyini üçün əsas metodlardan biridir. Mikropesessor sayğaclarının imkanları sayəsində həm aktiv, həm də reaktiv güc itkisi, harmonik komponentlər və sistemdəki qeyri-xətti yüklərin təsiri yüksək dəqiqliklə hesablanır [4].

Hər bir xətdə baş verən enerji itkiləri aşağıdakı kimi ifadə olunur:

$$\Delta W_L = \sum_{i=1}^N I_i^2 \cdot \Delta t \cdot R$$

Burada I_i - xəttəki cərəyanın qiyməti, Δt - ölçmə intervalı, R - xəttin müqavimətidir.

Bu halda, itkilər transformatorun nominal parametrləri əsasında, cərəyan və gərginliyin nominal qiymətləri nəzərə alınmaqla hesablanır. İtkilər həmçinin şəbəkə parametrlərinə əsasən də müəyyən edilə bilər; bunun üçün qidalandırıcı xəttin başlanğıc hissəsindəki ümumi yük qovşaq yüklərinə mütənəsib şəkildə paylanır.

Şəbəkədəki yük itkilərini xətlər və paylayıcı transformatorlar üzrə ayırmaq üçün ekvivalent müqavimət iki ardıcıl qoşulmuş ekvivalent müqavimət kimi təqdim olunur: bir hissəsi xəttin müqaviməti, digər hissəsi transformatorun öz müqaviməti hesab olunur. Paylayıcı elektrik şəbəkələrinin qidalandırıcılarında baş verən itkiləri hesablamaq üçün “ekvivalent aktiv müqavimət” metodu tətbiq edilir [5, 6].

Transformatorlarda aktiv itkilər (ΣP) isə aktiv itkilərin cəmi kimi müəyyən edilir.

$$\Delta P_{T\Sigma} = \Delta P_{TL} + \Delta P_{Tid}$$

Burada ΔP_{TL} - aktiv yük itkisi; ΔP_{Tid} - yüksüz rejimdə aktiv itki.

Bu halda, 110 kV və daha aşağı gərginlikli xətlərdə baş verən güc itkiləri aktiv (P_L) və reaktiv (Q_L) itkilər kimi aşağıdakı şəkildə müəyyən edilir:

$$\Delta P_L = R_L \cdot I_i^2 \quad \Delta Q_L = X_L \cdot I_i^2$$

Burada I_i - i -ci zaman anında ümumi cərəyanının qiyməti; R_L - xəttin aktiv müqaviməti; X_L - xəttin induktiv müqavimətidir.

Prosesin rejiminə uyğun sürətdə ölçmələrin aparılması üçün rejim parametrlərinin vektor ölçmə nəticələrindən effektiv tezlikdə istifadə etmək zəruridir [8]. Kommunal yüklü paylayıcı elektrik şəbəkələrində, ulduz-sıfır (star-to-zero) qoşulma sxemli transformatorlar istifadə olunur. Bu transformatorlar yüksək sıfır ardıcılıq müqavimətinə malikdir, təxminən müsbət ardıcılıq müqavimətindən daha yüksəkdir. Asimmetrik faza yükü olan hallarda bu transformatorlarda əhəmiyyətli sıfır ardıcılıq gərginliyi yaranır ki, bu da transformatorun ikinci tərəf sargılarında asimmetrik gərginliklərə səbəb olur. Transformatorların sıfır ardıcılığı üçün gərginliyin qeyri-simmetriklik əmsalı tez-tez icazə verilən həddən arıq olur.

Yüksək gərginlikli elektrik şəbəkəsi qovşaqlarında, o cümlədən elektrik qövs poladərilmə sobaları ilə poladərilmə müəssisələrdə, kəskin dəyişən yüklər müşahidə olunur. Bu cür dəyişən yüklər şəbəkədə güc keyfiyyətinin pisləşməsinə səbəb olur. Kəskin dəyişən yüklərin yüksək gərginlikli şəbəkə qovşaqlarında enerji keyfiyyətinə təsiri barədə geniş elmi-tədqiqat işlərinin aparılmasına baxmayaraq, bu problem hələ də tam həll olunmamış qalır və çox aktualdır [9].

Elektrik qövs poladəritmə sobalarının (EQPS) quraşdırıldığı müəssisələrin enerji təchizatı sistemlərində həm yüklərin kəskin dəyişməsi, həm də harmoniklərin yaranması baş verir. Bu cür hallarda qeyri-xətti yükün sistemdə yaratdığı dinamik təsirlərin dəqiq qiymətləndirilməsi mühüm əhəmiyyət kəsb edir.

Qeyri-xətti yükün kəskin dəyişmələrinin elektrik enerjisinin keyfiyyətinə təsirini öyrənmək üçün elektrik qövs poladəritmə sobaları qoşulmuş 220/110 kV-luq yarımstansiyada tədqiqat aparılmışdır. Təcrübələr zamanı xəttin hər iki ucunda aktiv və reaktiv güclərin ölçüləri yüksək dəqiqliklə aparılmış, transformator və xətt parametrləri nəzərə alınaraq güc itkiləri hesablanmışdır. Bu yanaşma, qeyri-xətti və asimmetrik yüklərin şəbəkədə yaratdığı təsirlərin dəqiq qiymətləndirilməsinə imkan verir və enerji itkilərinin azaldılması üçün optimal həll yollarının seçilməsində əsas yaradır.

Hazırda elektrik enerjisinin keyfiyyətini ölçmək üçün bir çox cihazlar və məlumat-hesablama kompleksləri mövcuddur. 110–220 kV yüksək gərginlikli şəbəkənin parametrlərini ölçmək, məlumatları daxil etmək və təhlil etmək üçün “SIMEAS Q” ölçmə-hesablama kompleksi istifadə olunmuşdur. Keyfiyyətin qeydiyyatını aparan cihaz aşağıdakı parametrləri ölçür: tezlik, aktiv, reaktiv və tam güc, güc faktoru, gərginliklər, flicker-in dozasi, 1÷40-cı harmoniklər (gərginlik və cərəyan üzrə), ümumi harmonik komponentlər, sistemin aktiv enerjisi, reaktiv – induktiv, tutum enerji və tam enerji [6].

Bundan əlavə, bu qiymətlərə əsasən prosessor ölçülən parametrləri hesablayır: güclər, $\cos \varphi$, flicker dozasi, harmoniklər və s. Bu qiymətlər cihazın yaddaşında saxlanılır və zamana görə məlumatları da əhatə edir. “SIMEAS Q” kompleksində ölçülən parametrlərin orta davamətmə müddəti 1÷3600 saniyə arasında dəyişir. Verilmiş həddən kənara çıxmaların ölçmə müddəti isə 10 millisaniyədən 3600 saniyəyə qədər intervalda müəyyən olunur.

Elektrik qövs poladəritmə sobalarını (EQPS) qidalandıran elektrik veriliş xətləri 220 kV şəbəkəyə 200 MVA-lıq avtotransformatorlar vasitəsilə qoşulur və daha sonra 330 və 500 kV şəbəkələrə ötürülür. EQPS-lar 35 kV-lıq şintlərdən 18 MVA-lıq 35/0.4 kV güc soba transformatoru və 0–16 Om tənzimləmə bilən ardıcıl reaktor vasitəsilə qidalanır. 35 kV-lıq şintlərə ümumi tutumu 22.4 MVAr olan kondensator batareyaları (KB) qoşulub: KB-1 ardıcıl reaktor ilə 9.8 MVAr tutuma və KB-2 12.6 MVAr tutuma malikdir.

Ölçmə planına uyğun olaraq altı seriyadan ibarət təcrübə aparılmışdır. Rejim parametrləri “SIMEAS Q” cihazı vasitəsilə birbaşa 110 kV-lıq hava xəttində, 220/110/10 kV yarımstansiyadan və ATR-2 girişində müxtəlif rejimlərdə ölçülmüşdür. Ölçmə nəticələrinin elektrik gücü keyfiyyəti göstəricilərinin orta hesablama intervalları ilə uyğunluq təmin edilmiş, rejim parametrləri üçün cihazın 10 ms, 1 s və 10 s-lik orta hesablamaları aparılmışdır.

EQPS-in işləmə dövrü üç xarakterik mərhələyə bölünür:

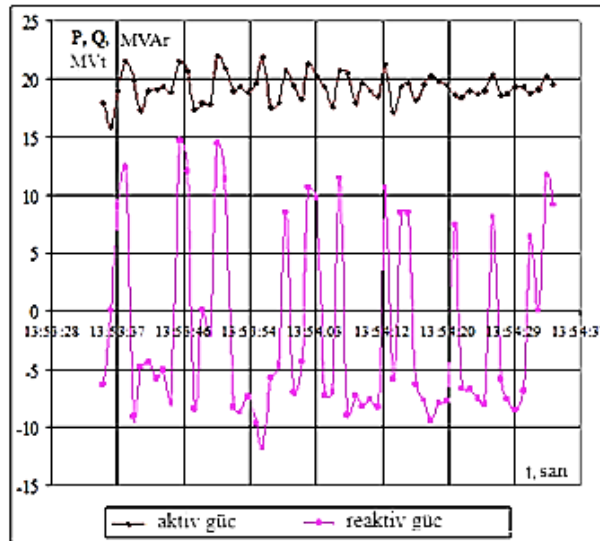
1. Güc mərhələsi – yükləmə materialı isidilir və metal əridilir;
2. Texnoloji mərhələ – oksidləşmə və reduksiya proseslərindən ibarətdir;
3. Köməkçi mərhələ – bu müddətdə bitmiş metal istehsalı, sobanın hazırlanması, təmizlənməsi və yüklənməsi həyata keçirilir.

Yüksək harmoniklərin yaranması əsasən güc və texnoloji mərhələlərdə baş verir. Güc mərhələsi zamanı soba yükləmə materialını isitmək və ərimə temperaturunu saxlamaq üçün tələb olunan enerjini istehlak edir. Bu mərhələnin davamlılığı ərimə prosesinin ümumi müddətinin 50–60%-ni təşkil edir və bu müddət ərzində sərf olunan enerji bütün ərimə prosesində sərf olunan enerjinin 60–80%-ni təşkil edir. Ərimə müddətində qövsün yanma rejimi son dərəcə sabit deyil; qövs gücü kəskin dəyişir, qısaqapanmaların sayı 100 və ya daha çox ola bilər. Bir qısaqapanmanın icazə verilən davamlılığı 2–8 saniyədir.

Əsas yarımstansiyada aktiv və reaktiv gücün dəyişmə qrafikləri şəkil 1-də göstərilmişdir. Ölçmələr zamanı əldə edilmiş məlumatların təhlili nəticəsində yarımstansiyanın yükünün 1–2 saniyə ərzində kəskin dəyişdiyi müəyyən edilmişdir. Aktiv güc 0–22 MW, reaktiv güc isə +15–12

MVAr diapazonunda dəyişir. Bu dəyişiklik P, Q, I və U ölçü cihazlarının göstəricilərində kəskin dəyişikliklər şəklində müşahidə olunmuşdur. Elektrik şəbəkəsinə ümumi qoşulma nöqtəsində gərginliyin qərarlaşmış meylətməsinə əsasən, elektrik enerjisinin keyfiyyəti standartın tələblərinə uyğun hesab olunur ki, qərarlaşmış meylətmənin bütün qiymətləri müəyyən bir müddət ərzində (24 saat) hər dəqiqə üçün ölçülən maksimum icazə verilən hədlər daxilində və eyni zamanda, qərarlaşmış meylətmənin ən azı 95%-i həmin dövr ərzində normal icazə verilən hədlər daxilində olsun.

Beləliklə, normal icazə verilən hədlərdən kənara çıxmaların ümumi davamətmə müddəti müəyyən edilmiş müddətin 5%-indən artıq ola bilməz, yəni 1 saat 12 dəqiqədən çox olmamalıdır. Eyni zamanda, icazə verilən hədlərin tam aşılması isə bu müddətin 0%-ni keçə bilməz.



Şəkil 1. 110 kV-luq hava xətti yarımstansiyasında aktiv və reaktiv gücün qeydiyyatının nəticələri

Gərginliyin rəqsləri onun dəyişmə böyüklüyü və fliker dozası ilə xarakterizə olunur. Hər hansı periodik və ya qeyri-periodik gərginlik rəqsi üçün həmin rəqslərin mövcud standart normalarına uyğunluğunu qiymətləndirmək xüsusi ölçmə vasitəsi – flikermetr vasitəsilə həyata keçirilə bilər. Ölçmə intervalı ərzində orta kvadratik gərginlik qiymətlərinin ölçü cihazları ilə qeydiyyatı aparılıbsa, qiymətləndirmə analitik üsullarla da həyata keçirilə bilər.

Gərginliyin δU_i dəyişmə diapazonu faizlə aşağıdakı düsturla hesablanır:

$$\delta U_i = \frac{|U_i - U_{i+1}|}{U_{nom}} \cdot 100$$

burada U_i , U_{i+1} - əsas tezlikli gərginliyin bir-birinin ardınca gələn ekstremumların və ya ekstremum ilə orta kvadratik qiymətlərin əhatəediciyinin üfüqi sahəsinin əsas tezliyin hər yarımperiodunda müəyyən edilən qiymətləridir.

Gərginlik dəyişmələrinin təkrarlanma tezliyi $F_{\delta U_t}$ (san^{-1} , dəq^{-1}) gərginlik dəyişmələri periodik olduqda aşağıdakı düsturla hesablanır:

$$F_{\delta U_t} = \frac{m}{t}$$

burada m - t zaman müddətində gərginlik dəyişmələrinin sayı; t - ölçmələrin yerinə yetirildiyi zaman intervalıdır.

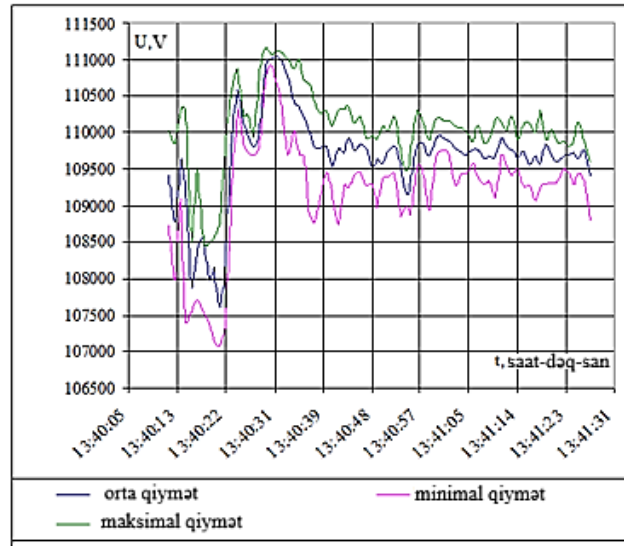
Gərginlik dəyişmələri arasındakı zaman intervalı $\Delta t_{i,i+1}$ (saniyə və ya dəqiqə ilə) aşağıdakı düsturla hesablanır:

$$\Delta t_{i,i+1} = t_{i+1} - t_i$$

burada t_i, t_{i+1} - bir-birinin ardınca gedən gərginlik dəyişmələrinin başlanğıc anlarıdır, san.

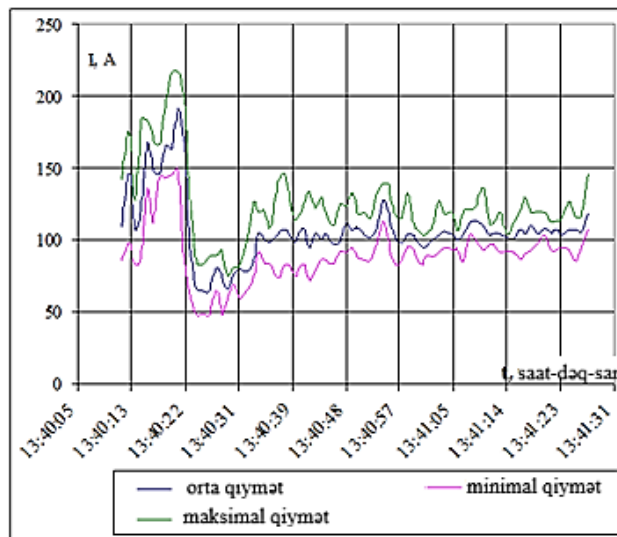
Gücün dəyişməsinin qiymətindən asılı olaraq, EQPS gərginliyin 1-3% həddlərində dəyişməsinə səbəb olur.

Gərginliyin dəyişmə həddləri. “Simeas Q” cihazının ortalama müddəti 1 saniyə olduqda 220\110\10 kV yarımstansiyasının 110 kV şinində gərginliyin dəyişməsi həddləri şəkil 2-də göstərilmişdir. Bu zaman düyündə maksimum və minimum gərginliyin qiymətləri 10 msan zaman intervalında ölçmələrə əsasən “Simeas Q” cihazı tərəfindən qeydə alınmış və orta qiyməti 1 saniyə zaman intervalı üçün hesablanmışdır. Maksimum və minimum gərginlik qiymətləri arasındakı fərq təxminən 1,5%-dir.



Şəkil 2. 220/110 kV yarımstansiyasının 110 kV-luq fazasında gərginliyinin dəyişmə qrafiki

Cərəyanların dəyişmə həddləri. “Simeas Q” cihazının ortalama müddəti 1 saniyə olduqda 220\110\10 kV yarımstansiyasının 110 kV-luq A fazasında cərəyanın dəyişmə həddləri 50-220 A və 75-150 A diapazonundadır (şəkil 3).



Şəkil 3. 220/110/10 kV yarımstansiyasının 110 kV fazasında cərəyanının dəyişmə qrafiki

Kəskin dəyişən yüklər qoşulduğu hal üçün gərginliyin dəyişməsinə hesablayarkən, şəbəkədə gərginlik itkilərinin qərarlaşmış qiymətlərini qiymətləndirmək üçün istifadə olunan ifadələrə analoji ifadələrdən istifadə etmək mümkündür:

$$\Delta U = \frac{\Delta P \cdot r + \Delta Q \cdot x}{U}$$

burada ΔP , ΔQ - aktiv və reaktiv güclərin dəyişməsidir.

Cərəyanların və gərginliklərin asimetriyası elektrik şəbəkələrində və elektrik enerjisi paylayıcı elementlərində enerji itkilərinin artmasına səbəb olur. Əgər elektrik dövrəsi induktivlik L ilə yüklənmişdirsə, onda cərəyan mənbəyi aşağıdakı kimi ifadə olunur:

$$i = I_m(\sin\omega t \pm (1/3)\sin 3\omega t)$$

O halda, enerji mənbəyinin gərginliyi aşağıdakı kimi olacaq:

$$u = L(di/dt) \cdot (\cos\omega t \pm \cos 3\omega t)$$

və bu qiymətlərə uyğun olan reaktiv güc, harmonik tərkiblər nəzərə alınmaqla aşağıdakı kimi müəyyən edilir:

$$Q = \int_{n=0}^{\infty} Q_n = U_1 I_1 \sin\varphi_1 + U_2 I_2 \sin\varphi_2 + \dots$$

burada Q - reaktiv güc; Q_n - reaktiv gücün nominal qiyməti; U_1, U_2 - harmonik tərkiblərə uyğun gərginliklər; I_1, I_2 - harmonik tərkiblərə uyğun cərəyanlardır.

Bu ifadəyə əsasən, 3-cü harmonikin işarəsindən asılı olmayaraq, aşağıdakı nəticə əldə edilir:

$$Q = \frac{2}{3} \omega L I_m^2$$

Reaktiv güc, müvafiq volt-ampere xarakteristikasının sahəsi ilə mütənasibdir [9].

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \frac{d}{dt} i(t) dt = 1$$

Gərginliklərin asimetriyası aşağıdakı göstəricilərlə xarakterizə olunur: əks ardıcılıq üzrə gərginliklərin asimetriya əmsalı; sıfır ardıcılığı üzrə gərginliklərin asimetriya əmsalı.

Əks ardıcılıq üzrə gərginliklərin qeyri-simmetrikliliyi əmsalı 0,9%-dən azdır.

Elektrik şəbəkələrinə ümumi qoşulma nöqtələrində əks ardıcılıqlı gərginliyin asimetriya əmsalının normal və icazə verilən hədləri müvafiq olaraq 2.0% və 4.0% təşkil edir. Ölçmələrin nəticələri göstərmişdir ki, ümumi qoşulma nöqtəsində əks ardıcılıq üzrə gərginliyin asimetriya əmsalları bu icazə verilən hədlər daxilində olmuşdur.

Yarımstansiyanın 110 kV şinlərində faza cərəyanları 50 A diapazonunda dəyişir. Ölçmələr nəticəsində əldə edilmiş fliker dozasının qiymətləri cədvəldə göstərilmişdir.

İki ölçmə intervalında əldə edilmiş fliker dəyərləri

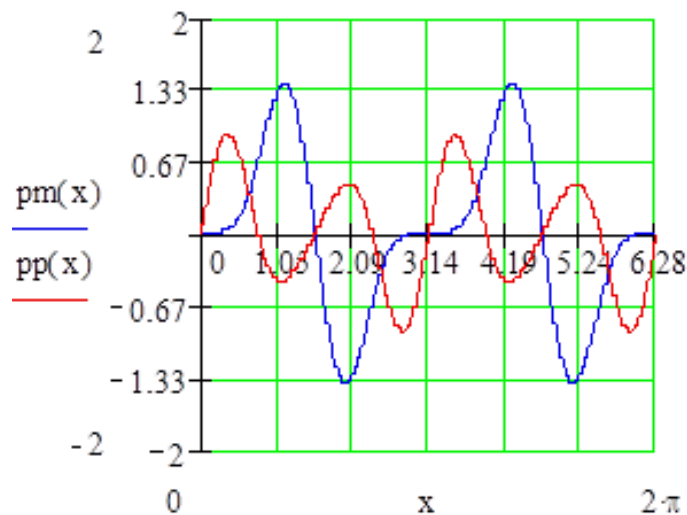
Qısamüddətli flikerin dozası		
L1	L2	L3
1,95585	1,998772	2,171604
1,05553	1,024602	1,063535
L1	L2	L3
1.134734	1.245012	1.316847
2.076777	2.248981	1.929558
1.791921	2.091446	1.990125

İcazə verilən istehlak payının hesablanması üçün hazırlanmış proqram sınaq dövrəsində yoxlanılmışdır. Yarımstansiyanın 110 kV şinlərinə qoşulmuş faktiki istehlakçı yükü 25,000 kVA, qovşaq ötürmə qabiliyyəti isə 400,000 kVA təşkil edir.

İstehlakçının nəzarət nöqtəsində enerjinin keyfiyyət göstəricisinə təsirinin hesablanması nəticələri göstərmişdir ki, flikerin dozası 1,4–2,3 diapazonunda dəyişir, bu isə normadan xeyli yüksəkdir.

Aparılmış ölçmələrin nəticələrinə əsasən qövs sobasının işə salınması zamanı şəbəkə cərəyanında yüksək dərəcədə harmonik təhriflər müşahidə olunur. Əsasən 3-cü, 5-ci və 7-ci harmoniklər üstünlük təşkil edir. Cərəyanın ümumi harmonik təhrif əmsalı (THD) bəzi rejimlərdə 25–30%-ə qədər yüksəlmişdir [4].

Şəkil 4-də 3-cü harmonikanın müxtəlif işarələrinə uyğun ani güc qrafikləri göstərilmişdir. Bu qrafiklərdən göründüyü kimi $pm(x)$ mənfi işarəyə, $pp(x)$ isə müsbət işarəyə uyğun gəlir.



Şəkil 4. 3-cü harmonikin qarşısında müxtəlif işarələr olduqda ani güc ayrılırları

Tədqiqatın aparılması çərçivəsində müasir avtomatlaşdırılmış məlumat ölçmə sistemlərinin (məsələn, SCADA, PMU), mikroprosessor əsaslı ölçmə cihazlarının (sayğacların) istifadəsi tələb olunur [10]. Bu sistemlər və cihazlar itkilərin komponentlərini ayrıca müəyyən etməyə və əlavə yüksək gərginlikli hava xəttinin uclarında rejim parametrlərinin cari qiymətlərinin ölçülməsinə əsaslanaraq enerji ölçmə sistemlərinin dəqiqliyini yoxlamağa imkan verir. Rejim parametrlərinin ölçülməsi üçün hazırlanmış bu sistemlər və komplekslər məlumatların ölçülməsi, orta qiymətlərin tapılması və saxlanması ilə bağlı bir çox problemləri həll etməyə və kompüterlə birlikdə yüksək gərginlikli hava xəttinin rejimləri, naqillərdə tac hadisələri və s. kimi proseslərin modelləşdirilməsinə və ölçmələrin keyfiyyətə yeni səviyyədə təşkil edilməsinə imkan verir.

Nəticə. Aparılmış eksperimental tədqiqatların nəticələri göstərir ki, qeyri-xətti yükün elektrik enerjisinin bəzi keyfiyyət göstəricilərinə, məsələn, flikerin dozalarına təsiri normadan xeyli yüksəkdir. Bu səbəbdən tələb olunan keyfiyyəti təmin etmək üçün elektrik stansiyasının layihələndirilməsi mərhələsində yüksək gərginlikli yarımstansiyada qeyri-xətti yükün kəskin dəyişməsi zamanı flikerin dozasının icazə verilən səviyyəsini qiymətləndirmək zəruridir.

Hazırda, enerji sistemində informasiya və kommunikasiya texnologiyalarının tətbiqi ilə əlaqədar olaraq, son zamanlar hava xəttində ümumi aktiv enerji itkilərini xəttin uclarındakı aktiv gücləri ölçməklə və onlardan təcdağı güc itkilərini və naqillərin istilik itkilərini təyin etmək üçün istifadə olunması məqsəduyğundur. Çox yüksək gərginlikli elektrik veriliş xətlərində aktiv güclərin fərqiə əsaslanan enerji itkilərinin qiymətləndirilməsi SCADA və PMU ölçmələri vasitəsilə, həmçinin intellektual sayğac və avtomatlaşdırılmış sistem vasitəsilə həyata keçirilə bilər.

Təsadüfi proseslər nəzəriyyəsinə əsaslanaraq mövcud enerji itkilərinin ölçmə sisteminin xətlərinin təhlili yüksək gərginlikli elektrik veriliş xətlərində itkilərin cari qiymətlərini praktik istifadə üçün tələb olunan dəqiqliklə əldə etməyə imkan verir. Praktikada ölçmə xətlərinin faktiki qiymətlərinin müəyyən edilməsi zəruridir. Buna görə də enerji ölçmə kompleksinin xətlərinin mürəkkəbliyini onun faktiki iş şəraitini nəzərə almaqla müəyyən etmək vacib hesab olunur. Aktiv güc ölçmə kompleksinin sistematik xətasının hesablanması və onun korreksiyası elektrik enerjisinin ölçmə dəqiqliyinin artırılmasına imkan verir.

Ədəbiyyat

1. Kamoliddinov S.S., Eraliev H.A., Qodirov A.A. (2022). Calculation of Power Losses in Electrical Networks Taking into Account Non-Sinusoidal Voltage. CENTRAL ASIAN JOURNAL OF THEORETICAL AND APPLIED SCIENCES Volume: 03 Issue: 11 | Nov 2022 ISSN: 2660-5317 <https://cajotas.centralasianstudies.org>
2. Andreeva L.V., Osika L.K., Tubinis V.V. (2010). /Under the general editorship of Osika L.K. Commercial metering of electric power in the wholesale and retail markets. - M.: AVOK, 2010.
3. Averbukh, M & Prasol, D. (2018). Influence of high-power nonlinear consumers on electric energy losses in mining high-voltage power line. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 327. 052028. 10.1088/1757-899X/327/5/052028.
4. Исаева Т.М. О результатах исследования высших гармоник на высоковольтной подстанции. Журнал «Главный энергетик» №11(162), 2016г.ст.32-36 (ISSN 2074-7489). УДК 621.3.08
5. Баламетов А.Б., Халилов Э.Д., Исаева Т.М. Экспериментальные исследования влияния резкопеременной нагрузки на качество электроэнергии на высоковольтной подстанции. Промышленная Энергетика. 2008 № 5, стр. 50-53.
6. Баламетов А.Б., İsayeva T.M. Моделирование гармонических составляющих тока в электрических сетях при нелинейной нагрузке. The Caucasus Economic & Social Analysis Journal of Southern Caucasus. ADNSU. ISSN: 2298-0946, E-ISSN: 1987-6114; DOI Prefix: 10.36962. AUGUST-SEPTEMBER 2019 VOLUME 33 ISSUE 06.pp.15-20
7. Balametov A.B., Khalilov E.D. (2013). Methods for predicting power losses of electric power systems for analysis and management. Electricity No. 7, pp. 19–29.
8. Balametov A.B., Khalilov E.D., Isaeva T.M. (2017). Choice of a mathematical model of an overhead line when simulating a mode using synchronized vector measurements //Electricity, No. 3, Publisher: National Publishing University "MPEI" (Moscow), ISSN: 0013-5380 (in Russian), p. 20-28.
9. Sayenko Y., Pawelek R., Baranenko T. (2023). Analysis of Reactive Power in Electrical Networks Supplying Nonlinear Fast-Varying Loads/*Energies* 2023, 16(24), 8011; <https://doi.org/10.3390/en16248011>
10. Ortiz G., Rehtanz C., Colomé G. (2021). Monitoring of power system dynamics under incomplete PMU observability conditions. *IET Gener. Transm. Distrib.* 2021; 15:1435–1450

Məqalə qəbul olunub: 30.10.25
Təvsiyə edib: dos. Sultanov E.F.