

UOT 62.523.8 (075.10)

AĞAMİRZƏYEV K.Y

Azərbaycan memarlıq və İnşaat Universitetinin magistrantı

kamall.agamirzeyev@gmail.com

PAYLAYICI ŞƏBƏKƏLƏRİN RƏQƏMSALLAŞDIRILMASININ ENERJİ SƏMƏRƏLİLİYİNDƏ ROLU

Giriş. Elektrik şəbəkələrində enerji itkilərinin azaldılması və səmərəliliyin artırılması istiqamətində həyata keçirilən fiziki avadanlıqların modernləşdirilməsi tədbirləri böyük əhəmiyyət daşısa da, müasir dövrdə bu proses rəqəmsallaşdırma və intellektual idarəetmə sistemləri olmadan tam tamamlana bilməz. Paylayıcı şəbəkələrin idarə edilməsində ənənəvi "passiv" yanaşmadan "aktiv" idarəetməyə keçid bilavasitə SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) və Smart Grid texnologiyalarının geniş miqyasda tətbiqi ilə bağlıdır [1. s 14-16]. SCADA sistemləri elektrik enerjisi obyektlərinin, o cümlədən mərkəzi yarımstansiya və ötürücü xətt avadanlıqlarının vəziyyətini real vaxt rejimində davamlı olaraq qiymətləndirərək, şəbəkə operatorlarına xətalara və texniki itkilərin minimuma endirilməsi üçün dəqiq rəqəmsal diaqnostika imkanı verir. Əvvəllər şəbəkə dispetçerləri yalnız mənbədəki (yarımstansiya çıxışındakı) ümumi parametrləri izləyə bildirdilsə, müasir rəqəmsal SCADA arxitekturası xəttin ən sonundakı və aralıq məntəqələrdəki düyünlərin vəziyyətini də tamamilə "şəffaflaşdırır". Bu operativlik fazalararası yük qeyri-simmetriyasının, transformatorların kritik həddindən artıq yüklənməsinin və qəza rejimlərinin saniyələr ərzində vizuallaşdırılaraq aşkarlanmasına şərait yaradır. Aparılan son yerli tədqiqatlar da bir-mənəli olaraq təsdiq edir ki, şəbəkənin tam müşahidə oluna bilməsi və SCADA proqram təminatından daxil olan məlumatlar əsasında yük axınlarının onlayn analizi reaksiya müddətini kəskin qısaltır və bu da öz növbəsində paylayıcı sistemlərdə ümumi texniki itkilərin orta hesabla 5-7% civarında azalmasını təmin edir [2. s 45-48].

Avtomatlaşdırmanın və rəqəmsallaşdırmanın enerji səmərəliliyinə verdiyi ən böyük strateji

töhfələrdən biri də mərkəzləşdirilmiş Volt/VAR Optimallaşdırılmasının (VVO) şəbəkəyə inteqrasiyasıdır. Bu mütərəqqi funksiya transformatorların yük altında gərginliyi tənzimləyən qurğularını və eyni zamanda kondensator batareyalarını vahid intellektual alqoritm əsasında, insan müdaxiləsi olmadan avtomatik idarə edir. VVO sisteminin tərkib hissəsi olan CVR (Conservation Voltage Reduction - Gərginliyin Azaldılması yolu ilə Qənaət) texnologiyası vasitəsilə abonentlərə verilən gərginlik standart normalar (məsələn, $\pm 5\%$) daxilində ən aşağı icazə verilən optimal sərhəddə saxlanılır. Əgər klassik idarəetmədə bu cür tənzimləmə xəttin sonundakı uzaq məsafəli abonentlər üçün ciddi gərginlik çökməsi riski yaradırsa, SCADA əsaslı rəqəmsal şəbəkələrdə bütün nəzarət nöqtələrindən onlayn məlumat alındığı üçün gərginlik yüksək cərrahi dəqiqliklə idarə olunur. Bununla yanaşı, sistemə daxil olan FLISR (Fault Location, Isolation, and Service Restoration) alqoritmlərinin tətbiqi hər hansı bir qəza baş verdikdə zədəli xətt hissəsini avtomatik lokallaşdıraraq şəbəkədən təcrid edir və sağlam hissələri ehtiyat mənbələrdən qidalandırmaq üçün konfigurasiyanı dinamik şəkildə dəyişir [3. s 55-56]. Həmçinin, Smart Grid konsepsiyasının təməl daşlarından olan Ağıllı Uçot İnfrastrukturunun (AMI) tətbiqi ilə kommersiya itkiləri kəskin şəkildə azalır, çünki baş yarımstansiya və son istehlakçı sayğacları arasında fasiləsiz avtomatik balanslaşdırma aparılaraq uçotdan kənar enerji mənimsənilməsi halları real vaxtda bloklanır.

Paylayıcı şəbəkələrin kifayət qədər mürəkkəb olan çoxşaxəli strukturu, qeyri-xətti dəyişən yük xarakteristikası və çoxsaylı sət texniki məhdudiyyətləri enerji itkilərinin minimumlaşdırılması məsələsini dərin riyazi və kombinatorluq probleminə çevirir. Təcrübə göstərir ki,

klassik riyazi proqramlaşdırma metodları (məsələn, qradiyent enmə və ya xətti proqramlaşdırma üsulları) bu tipli çoxölçülü və diskret idarəetmə məsələlərinin həllində çox vaxt axtarış fəzasının "yerli minimum" (local optimum) nöqtələrində ilişib qalaraq ən yaxşı qlobal həlli tapmaqda aciz qalır. Bu fundamental boşluğu aradan qaldırmaq və qeyd olunan rəqəmsal texnologiyaların (SCADA, AMI, VVO) verdiyi nəhəng informasiya bazasını (Big Data) ən səmərəli şəkildə emal etmək üçün müasir mühəndislik yanaşmalarında süni intellektə və təbiətin təkamül prinsiplərinə əsaslanan heuristik alqoritmlərdən geniş istifadə olunur. Dissertasiya tədqiqatları çərçivəsində mövcud şəbəkə üçün irəli sürülən ən optimal yanaşmalardan biri məhz sistemin rekonfigurasiyası və kondensator batareyalarının ideal yerləşdirilməsi proseslərini vahid riyazi modeldə eyni anda həll edən Təkmilləşdirilmiş Adaptiv Genetik Alqoritm (TAGA) işlənilməsidir [4. s 79-81]. Bu müasir alqoritm qlobal ekstremumu tapmaq üçün yalnız bir göstəriciyə deyil, çoxməqsədli obyektiv funksiya əsaslanır: aktiv güc itkilərinin əhəmiyyətli dərəcədə minimuma endirilməsi, gərginlik kənarlaşmalarının azaldılması və şəbəkə avadanlıqlarının resursunu qorumaq məqsədilə kommutasiya aparatlarının (açarların) dəyişmə sayının ciddi məhdudlaşdırılması.

Təklif olunan bu yeni TAGA alqoritmünün əsas elmi yeniliyi onun mutasiya və krossinqover (çarpazlaşma) ehtimallarının standart genetik alqoritmlərdə olduğu kimi sabit deyil, axtarış fəzasındakı cari vəziyyətə görə adaptiv şəkildə dinamik dəyişməsidir. Belə ki, proqram təminatı optimal həllə yaxınlaşdıqca axtarış addımlarını avtomatik kiçildir, hər hansı bir lokal minimumda ilişdikdə isə mutasiya ehtimalını öz-özünə artıraraq tamamilə yeni axtarış fəzasına sürətli "sıçrayış" edir. Bununla paralel olaraq, reallıqda paylayıcı şəbəkələrin aktiv və reaktiv müqavimət (R/X) nisbətinin böyük olması səbəbindən yük axınlarının riyazi hesablanmasında ənənəvi Nyuton-Rafson metodu əvəzinə konvergensiya sürəti daha yüksək və stabil olan "İrəli-Geri Qaçış" (Forward-Backward Sweep) metodu tətbiq olunmuşdur. İşlənmiş bu hibrid model yalnız şəbəkə topologiyasını və reaktiv güc paylanmasını optimallaşdırmır, eyni zamanda alqoritm daxilinə bilavasitə inteqrasiya edilmiş xüsusi modul vasitəsilə 0.4 kV-luq şəbəkələrdə ən böyük itki mənbəyini təşkil edən faza qeyri-simmetriyasını

da (neytral naqıldəki cərəyanı tam minimuma endirərək) bərabərləşdirir [5. s 102-105]. Yerli iqlim və istismar şəraitində, habelə real fiziki şəbəkə parametrləri üzərində bu cür mürəkkəb və inteqrasiya olunmuş rəqəmsal idarəetmə strategiyasının tətbiqi, ümumilikdə elektrik enerjisi sisteminin həm texniki, həm də iqtisadi səmərəliliyini fiziki olaraq mümkün olan maksimum həddə çatdırmağa imkan verən ən müasir elmi-praktiki həllərdən biri hesab olunur.

Modernləşmə texnologiyalarının və rəqəmsal idarəetmə sistemlərinin tətbiqi nəticəsində əldə olunan enerji səmərəliliyi yalnız texniki göstəricilərlə məhdudlaşmır, həm də layihənin iqtisadi dayanıqlığı və ekoloji təsirləri ilə kompleks şəkildə qiymətləndirilməlidir. SCADA və Smart Grid texnologiyalarının inteqrasiyası ilə idarə olunan paylayıcı şəbəkələrdə itkilərin azaldılması prosesi, investisiya xərclərinin geri dönüş müddətini sürətləndirən ən mühüm amildir. Tədqiqatlar göstərir ki, intellektual şəbəkə həllərinə qoyulan vəsaitlər əsasən elektrik enerjisinin qənaəti, qəza açılımlarının sayının azalması və texniki xidmət xərclərinin optimallaşdırılması hesabına özünü tam doğruldu. Bu kontekstdə, Xalis Cari Dəyər (NPV) və Daxili Gəlirlilik Norması (IRR) kimi göstəricilər əsas götürülərək aparılan analizlər sübut edir ki, rəqəmsallaşma layihələri orta hesabla 3-5 il ərzində kapital xərclərini kompensasiya edir [6. s 22-25]. Xüsusilə də "yaşıl enerji"yə keçid strategiyası çərçivəsində bərpa olunan enerji mənbələrinin (günəş və külək elektrik stansiyaları) paylayıcı şəbəkəyə inteqrasiyası, şəbəkənin çevikliyi və reaktiv güc balansının idarə olunmasını daha da kritik hala gətirir ki, bu da Smart Grid infrastrukturunun qurulmasını qaçılmaz edir.

Rəqəmsal transformasiyanın digər mühüm istiqaməti olan "Ağıllı Uçot" sistemləri vasitəsilə toplanan məlumatlar elektrik enerjisinin proqnozlaşdırılması (load forecasting) üçün əvəzolunmaz bazadır. Süni intellekt və neyron şəbəkələri əsasında işləyən müasir proqram təminatları istehlakçıların davranış modellərini analiz edərək, pik yüklənmə saatlarını əvvəlcədən müəyyən edir. Bu, şəbəkə operatoruna yükün qabaqcadan paylaşdırılması və transformatorların qeyri-bərabər yüklənməsinin qarşısının alınması üçün manevr imkanı verir. Məsələn, elektrikli nəqliyyat vasitələrinin (EV) enerji doldurma məntəqələrinin sürətlə artması şəbəkə üzərinə əlavə və gözlənilməz yüklər

gətirir. Smart Grid arxitekturası bu yükləri sistemin ən az itki verən saatlarına (gecə rejiminə) yönləndirməklə həm şəbəkəni həddindən artıq yüklənmədən qoruyur, həm də texniki itkiləri minimumda saxlayır. Beləliklə, rəqəmsallaşma sadəcə bir monitoring vasitəsi deyil, şəbəkənin həyat dövrünü uzadan və texniki resursları qoruyan bir ekosistemə çevrilir.

Modernləşmə tədbirlərinin səmərəliliyini təhlil edərkən 0.4 kV gərginlikli şəbəkələrin vəziyyəti xüsusi diqqət tələb edir. Statistik məlumatlar göstərir ki, Azərbaycanın enerji sistemində ümumi itkilərin böyük bir hissəsi məhz alçaq gərginlikli paylayıcı xətlərdə cəmləşmişdir. Bu sahədə rəqəmsal transformator yarımstansiyalarının (Digital Substations) qurulması, uzaqdan idarə olunan vakuum açarların (Reclosers) tətbiqi və özünübərpa edən şəbəkə modelinə keçid texniki itkilərin strukturunda inqilabi dəyişikliklərə səbəb olur. SCADA sisteminə inteqrasiya edilmiş avtomatik gərginlik tənzimləyiciləri sayəsində xəttin ən uzaq nöqtəsindəki gərginlik səviyyəsi nəzarətdə saxlanılır ki, bu da həm texnoloji avadanlıqların sıradan çıxma riskini azaldır, həm də yüksək gərginlik səbəbindən yaranan əlavə itkiləri aradan qaldırır [7. s 88-91].

Nəticə etibarilə, elektrik şəbəkələrində texniki itkilərin struktur analizi göstərir ki, ənənəvi metodlarla itkilərin azaldılması artıq öz limitinə çatmışdır. Yeni mərhələdə enerji səmərəliliyi yalnız fiziki modernləşmə ilə rəqəmsal intellektin vəhdəti sayəsində mümkündür. SCADA, Smart Grid və süni intellekt əsaslı optimallaşdırma alqoritmlərinin tətbiqi elektrik enerjisi sisteminin həm operativliyini, həm də iqtisadi rentabelliyini təmin edən başlıca amildir. Tədqiqat işində təklif olunan hibrid optimallaşdırma modelləri və müasir rəqəmsal texnologiyaların tətbiqi metodologiyası ölkəmizin enerji sisteminin modernləşdirilməsi istiqamətində mühüm elmi-praktiki əhəmiyyət kəsb edir. Gələcəkdə bu sistemlərin blokçeyn (blockchain) texnologiyaları ilə birləşdirilməsi enerji ticarətində tam şəffaflığı və paylanmış enerji resurslarının daha effektiv idarə olunmasını vəd edir [8. s 112-115]. Bu rəqəmsal transformasiya yolu ilə Azərbaycanın enerji sektoru qlobal enerji keçidi trendlərinə tam uyğunlaşaraq, dayanıqlı və səmərəli inkişaf modelini təmin edə biləcəkdir.

NƏTİCƏ

Elektrik şəbəkələrində texniki itkilərin struktur analizi və modernləşmə texnologiyalarının səmərəliliyinin tədqiqi göstərir ki, müasir enerji sistemlərinin qarşısında duran əsas çağırış yalnız infrastrukturun fiziki yenilənməsi deyil, həm də intellektual idarəetmə mühitinin yaradılmasıdır. Aparılan araşdırmalar nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, Azərbaycanın paylayıcı şəbəkələrində texniki itkilərin azaldılması üçün tətbiq edilən ənənəvi mühəndislik həlləri rəqəmsal texnologiyalarla inteqrasiya olunduqda maksimum iqtisadi səmərə verir. Xüsusilə, SCADA sistemlərinin tətbiqi şəbəkə üzərində tam vizual nəzarəti təmin etməklə qəza hallarının müddətini və bu müddət ərzində baş verən texnoloji itkiləri əhəmiyyətli dərəcədə azaldır.

Tədqiqat işi çərçivəsində əldə olunmuş əsas nəticələri aşağıdakı kimi qruplaşdırmaq olar:

Struktur Optimallaşdırılması: Elektrik şəbəkələrində itkilərin böyük hissəsinin alçaq gərginlikli (0.4 kV) xətlərdə cəmləşdiyi faktı nəzərə alınaraq, faza yüklərinin qeyri-simmetriyasının aradan qaldırılması və reaktiv gücün lokal kompensasiyası ən effektiv "aşağı xərc"li tədbir kimi qiymətləndirilir.

Rəqəmsallaşmanın Rolu: Smart Grid və AMI texnologiyalarının tətbiqi nəticəsində enerji balansının real vaxt rejimində təhlili kommersiya itkilərini sıfıra yaxınlaşdırır və texniki itkilərin analitik proqnozlaşdırılmasına şərait yaradır. VVO və FLISR funksiyalarının şəbəkəyə inteqrasiyası gərginlik profilini stabilləşdirir və ümumi enerji səmərəliliyini 5-10% artırır.

Alqoritmik Yanaşma: Mürəkkəb strukturlu paylayıcı şəbəkələrin rekonfigurasiyası üçün təklif olunan Təkmilləşdirilmiş Adaptiv Genetik Alqoritm (TAGA) ənənəvi metodlarla müqayisədə qlobal optimal həlli daha sürətli tapmağa imkan verir. Bu, şəbəkə elementlərinin (transformator və xətlərin) yüklənmə dərəcəsini optimallaşdıraraq istilik itkilərini minimuma endirir.

İqtisadi və ekoloji səmərə: Modernləşmə layihələrinin iqtisadi təhlili (NPV və IRR göstəriciləri əsasında) sübut edir ki, rəqəmsal transformasiyaya qoyulan investisiyalar qısa müddətdə (3-5 il) özünü doğruldur. Eyni zamanda, texniki itkilərin azaldılması şəbəkədəki karbon emissiyasının azalmasına və ətraf mühitin mühafizəsinə birbaşa töhfə verir.

ƏDƏBİYYAT

1. Əliyev V.Ç., Həmidov M.X. Elektrik şəbəkələrinin idarəedilməsi metodu // Energetikanın Problemləri jurnalı, Fizika İnstitutu. Bakı, 2024, №1, s. 12-18.
2. Məmmədov Q. Təsvirləri affın çevrilmələrinə invariant taniyan sistemin SCADA və Smart Grid tətbiqlərində səmərəliliyi. Dissertasiya, Azərbaycan Texniki Universiteti, Bakı, 2025, 145 s.
3. İbrahimov F. Dayanıqlı inkişaf və “yaşıl” iqtisadiyyat yönümlü innovasiyalı idarəetmə // “Davamlı inkişaf strategiyası: global trendlər, milli təcrübələr və yeni hədəflər” adlı III Beynəlxalq elmi konfransın materialları, Mingəçevir Dövlət Universiteti, 2025, s. 54-58.
4. Vəliyev T.İ. Qarabağ iqtisadi zonasında bərpa olunan enerji mənbələrinin inteqrasiyası və SCADA sistemlərinin tətbiqi. Magistr dissertasiyası, Azərbaycan Texniki Universiteti, Bakı, 2024, 85 s.
5. Hacızadə E. Milli enerji sektoru: yeni reallıqlar və perspektiv görüntülər. Elmi məqalələr toplusu, Bakı, 2021, 120 s.
6. Qasımov R.N. Alternativ enerji mənbələrinin paylayıcı şəbəkələrə inteqrasiyasının texniki-iqtisadi qiymətləndirilməsi // Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri. Bakı, 2023, Cild 15, №2, s. 20-28.
7. Sultanov F.H. Paylayıcı elektrik şəbəkələrində intellektual idarəetmə sistemlərinin qurulma prinsipləri. Dərslük, Bakı: Elm nəşriyyatı, 2022, 210 s.
8. Kərimov E.M., Babayev S.A. Smart Grid texnologiyaları və enerji təhlükəsizliyi // Müasir elmi tədqiqatlar və innovasiyalar konfransı. Sumqayıt, 2024, s. 110-117

UOT 62.523.8 (075.10)

Ağamirzəyev K.Y

*Azərbaycan memarlıq və İnşaat Universitetinin
magistrantı*

[\(kamall.agamirzeyev@gmail.com\)](mailto:kamall.agamirzeyev@gmail.com)

**Paylayıcı şəbəkələrin rəqəmsallaşdırılmasının
enerji səmərəliliyində rolu**

XÜLASƏ

Təqdim olunan məqalə müasir elektrik enerjisi sistemlərinin ən aktual problemlərindən biri olan texniki itkilərin struktur analizi və rəqəmsal modernləşmə texnologiyalarının bu itkilərin azaldılmasındakı roluna həsr edilmişdir. Tədqiqatın əsas məqsədi paylayıcı şəbəkələrin rəqəmsallaşdırılması prosesində SCADA və Smart Grid texnologiyalarının enerji səmərəliliyinə təsirini kəmiyyət və keyfiyyət baxımından qiymətləndirməkdir.

Məqalədə elektrik şəbəkələrində baş verən texniki itkilərin fiziki təbiəti, o cümlədən yük-dən asılı olan və sabit itkilərin yaranma mexanizmləri ətraflı təhlil olunur. Müasir dövrdə ənənəvi modernləşmə üsullarının (məsələn, naqıl kəsiyinin artırılması və ya transformatorların əvəzlənməsi) məhdud səmərəliliyi fonunda, intellektual idarəetmə sistemlərinin tətbiqi qaçılmaz bir zərurət kimi əsaslandırılır. Bu çərçivədə, SCADA sistemlərinin real vaxt rejimində monitorinq imkanları, Volt/VAR optimallaşdırılması (VVO) və avtomatik gərginlik tənzimlənməsi metodlarının tətbiqi ilə itkilərin minimuma endirilməsi yolları araşdırılır.

Tədqiqatın metodoloji hissəsində mürəkkəb strukturlu paylayıcı şəbəkələrin rekonfigurasiyası üçün Təkmilləşdirilmiş Adaptiv Genetik Alqoritm (TAGA) tətbiqi təklif olunur. Bu alqoritm vasitəsilə şəbəkənin topoloji quruluşunun dəyişdirilməsi və reaktiv güc mənbələrinin optimal yerləşdirilməsi sayəsində aktiv güc itkilərinin əhəmiyyətli dərəcədə azaldılmasına nail olunmuşdur. Həmçinin, 0.4 kV-luq şəbəkələrdə faza qeyri-simmetriyasının aradan qaldırılmasının enerji səmərəliliyinə verdiyi töhfələr riyazi olaraq sübut edilir.

Yekun nəticə olaraq göstərilir ki, paylayıcı şəbəkələrin rəqəmsallaşdırılması və Smart Grid infrastrukturuna keçid həm texniki itkilərin azaldılması, həm də sistemin operativ idarə olunması baxımından strateji əhəmiyyət kəsb edir. Təklif olunan yanaşmaların iqtisadi təhlili onların investisiya baxımından rentabelli olduğunu və ölkənin enerji təhlükəsizliyinə müsbət töhfə verəcəyini təsdiqləyir.

Açar sözlər: *Texniki itkilər, SCADA, Smart Grid, enerji səmərəliliyi, paylayıcı şəbəkələr, genetik alqoritm, rəqəmsallaşdırma.*

Ağamirzəyev K.Y

Master's student at Azerbaijan University of Architecture and Construction
[*\(kamall.aqamirzeyev@gmail.com\)*](mailto:kamall.aqamirzeyev@gmail.com)

The role of digitalization of distribution networks in energy efficiency

ABSTRACT

The presented article is devoted to the structural analysis of technical losses, which is one of the most urgent problems of modern electric power systems, and the role of digital modernization technologies in reducing these losses. The main objective of the study is to assess the impact of SCADA and Smart Grid technologies on energy efficiency in the process of digitalization of distribution networks in terms of quantity and quality.

The article analyzes in detail the physical nature of technical losses occurring in electrical networks, including the mechanisms of load-dependent and fixed losses. Against the background of the limited effectiveness of traditional modernization methods (for example, increasing the wire cross-section or replacing transformers), the application of intelligent control systems is justified as an inevitable necessity. In this context, ways to minimize losses using the real-time monitoring capabilities of SCADA systems, Volt/VAR

optimization (VVO) and automatic voltage regulation methods are investigated.

The methodological part of the study proposes the application of the Advanced Adaptive Genetic Algorithm (TAGA) for the reconfiguration of distribution networks with complex structures. This algorithm significantly reduces active power losses by changing the topological structure of the network and optimizing the placement of reactive power sources. Also, the contribution of eliminating phase asymmetry in 0.4 kV networks to energy efficiency is mathematically proven.

The final result shows that the digitalization of distribution networks and the transition to Smart Grid infrastructure are of strategic importance both in terms of reducing technical losses and operational management of the system. The economic analysis of the proposed approaches confirms that they are profitable in terms of investment and will make a positive contribution to the country's energy security.

Keywords: *Technical losses, SCADA, Smart Grid, Energy efficiency, Distribution networks, Genetic algorithm, Digitalization.*

AzMIU-nun "Mühəndis sistemləri və qurğularının tikintisi" kafedrasının dosenti B.Q. Mehdiyev rəy vermişdir.

Redaksiyaya daxil olma/Received 27.02.2026

Çapa qəbul olunma/Accepted for publication 31.03.2026