

MİKROŞƏBƏKƏLƏRDƏ ENERJİ AXINININ ÇOXMEYARLI OPTİMALLAŞDIRILMASI METODLARININ İŞLƏNMƏSİ

Xalid Qadir SADIZADE 
Azərbaycan Texniki Universitet
E-mail: xalidsedi@gmail.com

Received: 23 April 2026

Revised: 25 May 2026

Accepted: 25 June 2026

UOT: 338.47

JEL: L90; O14

DOI: <https://doi.org/10.32010/JZYT6325>

Xülasə. Tədqiqatın məqsədi – Məqalədə Azərbaycanın nəqliyyat-logistika sisteminin qlobal aspektləri baxılmışdır. Nəqliyyat-logistika sisteminin ölkə iqtisadiyyatında rolu və əhəmiyyəti araşdırılmışdır. Azərbaycanın son illərdə nəqliyyat-logistika sferasında apardığı islahatlar və iri layihələr təhlil edilmişdir. Ölkənin tranzit potensialının yüksək olmasının strateji aspektləri əsaslandırılmışdır. Yaxın və uzaq perspektivdə Azərbaycanın nəqliyyat-logistika sisteminin regional və qlobal rolu üzrə təkliflər hazırlanmışdır.

Tədqiqatın metodu formasında – analiz, sintez, müqayisə, statistik təhlil və proqnozlaşdırma metodlarından istifadə edilmişdir. Bunlarla bərabər, nəqliyyat-logistika problemlərinə dair tədqiqatlar aparmış, müxtəlif ölkə və xarici tədqiqatçıların əsərlərinə diqqət yetirilmişdir.

Tədqiqatın nəticələri – məqalədə verilmiş təkliflərdən regional və qlobal səviyyədə nəqliyyat-logistika sistemindən səmərəli istifadə edilməsi üzrə əlavə tədbirlərin və layihələrin hazırlanmasında istifadə oluna bilər.

Açar sözlər: Azərbaycan, qlobal kontekst, regional çağırışlar, nəqliyyat-logistika sistemi, qlobal nəqliyyat dəhlizləri, tranzit-nəqliyyat potensialı.

Giriş

Müasir dövrdə enerji sistemlərinin inkişafı, bərpa olunan enerji mənbələrinin sürətli artımı, elektrik enerjisinə tələbatın yüksəlməsi və enerji təhlükəsizliyinin təmin olunması elektrik şəbəkələrinin idarə olunmasına yeni yanaşmaların tətbiqini zəruri etmişdir. Ənənəvi mərkəzləşdirilmiş enerji sistemləri ilə müqayisədə mikroşəbəkələr (microgrids) daha çevik, etibarlı və dayanıqlı enerji təminatı imkanları təqdim edir. Mikroşəbəkələr lokal enerji mənbələri, enerji saxlanma sistemləri və istehlakçıların integrasiyası əsasında fəaliyyət göstərən, həm əsas enerji sistemi ilə əlaqəli, həm də avtonom rejimdə işləyə bilən enerji infrastrukturudur. Bu xüsusiyyətlər mikroşəbəkələri yeni nəsil ağıllı enerji sistemlərinin əsas elementlərindən birinə çevirmişdir.

Bərpa olunan enerji mənbələrinin, xüsusilə günəş və külək enerjisinin mikroşəbəkələrə geniş şəkildə integrasiyası enerji axınlarının idarə

edilməsində yeni problemlər formalaşdırmışdır. Bu enerji mənbələrinin istehsal gücünün dəyişkən xarakter daşması sistemdə enerji balansının qorunması, enerji itkilərinin azaldılması, gərginlik sabitliyinin təmin olunması və iqtisadi səmərəliliyin artırılması kimi məsələləri daha da aktuallaşdırmışdır. Belə şəraitdə yalnız bir parametərə əsaslanan optimallaşdırma yanaşmaları kifayət etmir və bir neçə məqsəd funksiyasının eyni vaxtda nəzərə alındığı çoxmeyarlı optimallaşdırma metodlarının tətbiqi zərurətə çevrilir.

Çoxmeyarlı optimallaşdırma yanaşmaları enerji sistemlərində müxtəlif texniki və iqtisadi göstəricilər arasında optimal balansın tapılmasına imkan verir. Bu metodlar enerji itkilərinin minimuma endirilməsi, enerji xərclərinin azaldılması, etibarlılığın artırılması və sistemin dayanıqlı işləməsinin təmin olunması kimi məqsədlərin paralel həllini mümkün edir. Müa-

sir tədqiqatlarda genetik alqoritmlər, hissəcik sürüsü optimallaşdırması, süni intellekt və maşın öyrənməsi əsaslı yanaşmalar bu sahədə geniş istifadə edilir.

Bu baxımdan mikroşəbəkələrdə enerji axınının çoxmeyarlı optimallaşdırılması metodlarının işlənməsi həm nəzəri, həm də praktiki baxımdan aktual elmi istiqamətlərdən biridir və enerji sistemlərinin gələcək inkişafı üçün mühüm əhəmiyyət daşıyır.

Nəzəri əsaslar

Mikroşəbəkələrdə enerji axınının çoxmeyarlı optimallaşdırılması elektrik enerji sistemləri nəzəriyyəsi, optimal güc axını modelləri, paylanmış enerji resurslarının idarə olunması, optimallaşdırma nəzəriyyəsi və ağıllı enerji şəbəkələri konsepsiyasının qarşılıqlı inteqrasiyasına əsaslanır. Bu sahənin formalaşması ənənəvi elektrik şəbəkələrinin inkişafı ilə yanaşı, bərpa olunan enerji mənbələrinin artması, enerji istehlakının strukturunun dəyişməsi və müasir enerji sistemlərinin rəqəmsallaşdırılması prosesləri ilə sıx bağlıdır. Xüsusilə XXI əsrin əvvəllərindən etibarən enerji sistemlərində mərkəzləşdirilmiş idarəetmə modelindən paylanmış və adaptiv idarəetmə modelinə keçid mikroşəbəkə texnologiyalarının inkişafını sürətləndirmişdir.

Elektrik enerji sistemlərində enerji axınının hesablanması və optimallaşdırılması nəzəriyyəsinin əsasları XX əsrin ortalarında formalaşmağa başlamışdır. Bu istiqamətdə ilk fundamental işlərdən biri elektrik şəbəkələrinin yük axınının hesablanması məsələsinə aid olmuşdur. Enerji sistemlərində güc axını probleminin riyazi modelləşdirilməsi elektrik şəbəkələrinin iş rejimlərinin təhlilinə, sistem yüklənməsinin hesablanmasına və enerji paylanması optimallaşdırılmasına imkan yaratmışdır. Bu sahədə mühüm töhfə verən alimlərdən biri William F. Tinney olmuşdur. O, 1960-cı illərdə böyük elektrik enerji sistemlərinin hesablama problemlərinin həllində seyrək matris (sparse matrix) metodlarının tətbiqini təklif etmişdir. Tinney və onun həmkarlarının tədqiqatları nəticəsində böyük həcmli enerji sistemlərində yük axını hesablamlarının sürəti əhəmiyyətli dərəcədə artmışdır. Onun tədqiqatları sonradan enerji sistemlərinin kompüter modelləşdirilməsinin inkişafında əsas baza rolunu oynamışdır [1].

Enerji sistemlərinin optimallaşdırılması sahəsində əsas nəzəri mərhələlərdən biri optimal güc axını (Optimal Power Flow - OPF) nəzəriyyəsinin yaranması olmuşdur. Bu anlayışın inkişafında mühüm rol oynamış alimlərdən biri Dommel H. W. hesab edilir. Dommel optimal güc axını məsələsinin yalnız enerji balans deyil, həm də sistem məhdudiyyətləri, gərginlik hədləri, enerji itkiləri və iqtisadi göstəricilər əsasında həll edilməsini təklif etmişdir. Onun tədqiqatlarında ilk dəfə olaraq enerji sistemlərində çoxparametrlı optimallaşdırma yanaşmaları tətbiq edilmişdir [2].

1970–1980-ci illərdə enerji sistemlərinin inkişafı ilə əlaqədar yeni optimallaşdırma metodlarının tətbiqinə ehtiyac yaranmışdır. Klassik riyazi optimallaşdırma yanaşmaları böyük və qeyri-xətti enerji sistemlərinin həllində müəyyən məhdudiyyətlərlə üzləşdiyindən tədqiqatçılar alternativ hesablama metodlarına müraciət etmişlər. Bu dövrdə xətti proqramlaşdırma, qeyri-xətti proqramlaşdırma və dinamik proqramlaşdırma üsulları enerji sistemlərində geniş istifadə olunmağa başlanmışdır.

Mikroşəbəkə anlayışının elmi əsaslandırılması və müasir enerji sistemlərinə tətbiqi istiqamətində fundamental tədqiqatlar aparan əsas alimlərdən biri Robert H. Lasseter olmuşdur. O, mikroşəbəkələri paylanmış enerji resurslarının, enerji saxlanma sistemlərinin və lokal yüklərin birləşdiyi müstəqil enerji sistemi kimi xarakterizə etmişdir. Lasseterin araşdırmalarında mikroşəbəkələrin iki əsas iş rejimi -şəbəkəyə qoşulmuş və avtonom rejimlər geniş şəkildə təhlil edilmişdir. Müəllif göstərmişdir ki, mikroşəbəkələr enerji təchizatının etibarlılığını artırmaqla yanaşı enerji itkilərinin azaldılmasına da imkan verir [3].

2002-ci ildə Lasseter tərəfindən təqdim edilən mikroşəbəkə konsepsiyası sonradan beynəlxalq enerji sistemləri tədqiqatlarında əsas istiqamətlərdən birinə çevrilmişdir. Onun işləri ABŞ-da və Avropa ölkələrində bir çox pilot layihələrin hazırlanmasına səbəb olmuşdur.

Bərpa olunan enerji mənbələrinin elektrik şəbəkələrinə inteqrasiyası sahəsində geniş tədqiqatlar aparmış alimlərdən biri Mohammad Shahidehpour olmuşdur. O, enerji sistemlərində yük balans, enerji ehtiyatlarının planlaşdırılması və mikroşəbəkələrin iqtisadi idarə edilməsi məsələlərini tədqiq etmişdir. Shahidehpour

göstərmişdir ki, günəş və külək enerjisi kimi dəyişkən xarakterli enerji mənbələrinin sistemə daxil olması enerji axınlarının idarə edilməsini daha mürəkkəb edir və adaptiv optimallaşdırma yanaşmalarını zəruri edir [4]. Onun tədqiqatlarında enerji sistemlərinin idarə edilməsində çoxmeyarlı optimallaşdırma prinsipləri tətbiq edilmişdir. Bu yanaşmada enerji xərcləri, enerji itkiləri, gərginlik sabitliyi və sistem etibarlılığı eyni vaxtda optimallaşdırma funksiyasına daxil edilmişdir.

Mikroşəbəkələrdə enerji axınının optimallaşdırılmasının nəzəri əsaslarından biri də çoxmeyarlı qərar qəbuletmə nəzəriyyəsinə əsaslanır. Klassik optimallaşdırma üsullarında əsas məqsəd bir funksiyanın minimallaşdırılması və ya maksimallaşdırılması olduğu halda, enerji sistemlərində çoxlu sayda texniki və iqtisadi göstəricilər nəzərə alınmalıdır. Bu isə çoxmeyarlı optimallaşdırma yanaşmalarının inkişafına səbəb olmuşdur. Bu istiqamətdə mühüm yanaşmalardan biri Pareto optimallaşdırma nəzəriyyəsinə əsaslanır. İtalyan iqtisadçısı Vilfredo Pareto tərəfindən irəli sürülmüş Pareto səmərəliliyi prinsipi sonradan enerji sistemlərinin optimallaşdırılmasında geniş tətbiq edilmişdir. Bu prinsipə görə bir parametr yaxşılaşdırlarkən digər parametrlərin pisləşməməsi tələb olunur [5].

Müasir dövrdə mikroşəbəkələrdə enerji axınının optimallaşdırılması sahəsində süni intellekt texnologiyaları xüsusi yer tutur. Bu istiqamətdə mühüm mərhələlərdən biri James Kennedy və Russell Eberhart tərəfindən hissəcik sürüşü optimallaşdırması metodunun hazırlanması olmuşdur. Bu metod quş sürülərinin kollektiv davranış modelinə əsaslanaraq enerji sistemlərində optimal həllərin tapılmasına imkan verir [6]. John Holland tərəfindən genetik alqoritmlərin yaradılması enerji sistemlərinin çoxmeyarlı optimallaşdırılmasında yeni mərhələ yaratmışdır. Genetik alqoritmlər təbii seçmə prinsiplərinə əsaslanaraq mürəkkəb optimallaşdırma problemlərinin həllində yüksək nəticələr vermişdir.

Son illərdə dərin öyrənmə, süni neyron şəbəkələri, qeyri-səlis məntiq sistemləri və gücləndirməli öyrənmə metodları mikroşəbəkələrin enerji idarə edilməsində geniş tətbiq olunmağa

başlanmışdır. Bu metodlar enerji istehsalının proqnozlaşdırılması, enerji tələbatının qiymətləndirilməsi və enerji axınlarının real vaxt rejimində optimallaşdırılmasında istifadə olunur.

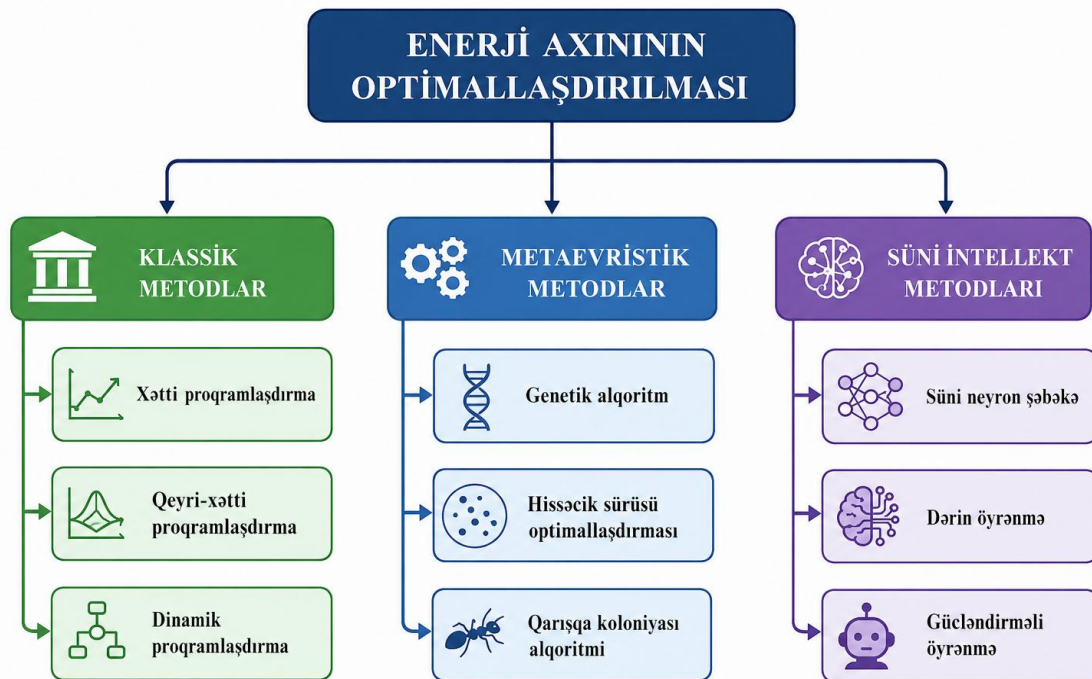
Mikroşəbəkələrdə enerji axınının optimallaşdırılması yanaşmaları və müasir metodlar

Mikroşəbəkələrin enerji sistemlərinə daxil olması elektrik şəbəkələrinin strukturunda keyfiyyətə yeni mərhələnin formalaşmasına səbəb olmuşdur. Ənənəvi enerji sistemlərində enerji axını əsasən mərkəzləşdirilmiş elektrik stansiyalarından istehlakçılara doğru bir istiqamətdə həyata keçirilirdisə, mikroşəbəkələrdə enerji axınları çoxmənbəli və dinamik xarakter daşıyır. Günəş panelləri, külək turbinləri, enerji saxlanma qurğuları və lokal generasiya mənbələrinin eyni şəbəkə daxilində paralel fəaliyyəti enerji idarə edilməsini mürəkkəbləşdirir. Bu səbəbdən enerji axınının optimallaşdırılması yalnız enerji bölgüsünün tənzimlənməsi deyil, həm də enerji sisteminin texniki-etibarlılıq göstəricilərinin qorunması məsələsinə çevrilmişdir [7, s.41].

Mikroşəbəkələrdə optimallaşdırma probleminin əsas məqsədi enerji sistemində bir-biri ilə ziddiyyət təşkil edən bir neçə parametr arasında optimal tarazlığın müəyyən edilməsidir. Praktiki şəraitdə enerji itkilərinin minimumlaşdırılması, istehsal xərclərinin azaldılması, gərginlik sabitliyinin qorunması, enerji keyfiyyətinin yüksəldilməsi və bərpa olunan enerji resurslarından maksimum istifadə eyni vaxtda təmin edilməlidir. Tək məqsədli optimallaşdırma üsulları bu tələbləri tam ödəmədiyindən enerji sistemlərində çoxmeyarlı optimallaşdırma yanaşmaları inkişaf etmişdir [8, s.117].

Müasir tədqiqatlar göstərir ki, mikroşəbəkələrdə enerji axınının idarə olunması üçün istifadə olunan metodlar üç əsas qrupa ayrılır: klassik riyazi metodlar, metaevristik alqoritmlər və süni intellekt əsaslı yanaşmalar. Bu metodların qarşılıqlı inteqrasiyası enerji sistemlərinin daha dəqiq və adaptiv idarə olunmasına imkan yaradır.

Aşağıdakı sxem mikroşəbəkələrdə enerji axınının optimallaşdırılması metodlarının strukturunu göstərir:



Şəkil 1. Mikroşəbəkələrdə enerji axınının optimallaşdırılması metodlarının təsnifatı

Klassik optimallaşdırma üsulları enerji sistemlərinin ilkin inkişaf mərhələlərində geniş istifadə edilmişdir. Xətti proqramlaşdırma, qeyri-xətti proqramlaşdırma və dinamik proqramlaşdırma kimi metodlar enerji istehsalı və enerji paylanması məsələlərinin həllində mühüm rol oynamışdır. Lakin bu metodların tətbiqi əsasən kiçik ölçülü və sabit parametrlərə malik sistemlərdə yüksək nəticə vermişdir. Mikroşəbəkələrdə dəyişkən və qeyri-müəyyən parametrlərin artması klassik üsulların hesablama imkanlarını məhdudlaşdırmışdır [9, s.62].

Bu səbəbdən sonrakı mərhələdə metaevristik optimallaşdırma metodları inkişaf etdirilmişdir. Bu metodlar təbiətdə mövcud olan davranış modellərinin riyazi təsvirinə əsaslanır. Xüsusilə genetik alqoritmlər və hissəcik sürüsü optimallaşdırması enerji sistemlərində geniş istifadə edilmişdir. Bu yanaşmaların əsas üstünlüyü lokal minimum nöqtələrdən yayınaraq global optimal həllə yaxın nəticələr verməsidir [10, s.203].

Müasir enerji sistemlərində ən sürətli inkişaf edən istiqamətlərdən biri süni intellekt əsaslı optimallaşdırma yanaşmaları hesab olunur. Süni neyron şəbəkələri enerji tələbatının proqnozlaşdırılması, dərin öyrənmə metodları enerji istehsalının modelləşdirilməsi, gücləndirməli öyrənmə alqoritmləri isə enerji axınlarının real

vaxt rejimində idarə olunmasında istifadə edilir. Bu yanaşmalar sistemin əvvəlki davranışını öyrənərək adaptiv qərar qəbul etmə imkanları yaradır.

Mikroşəbəkələrdə enerji axınının optimallaşdırılması metodlarının effektivliyini qiymətləndirmək məqsədilə tədqiqatlarda geniş istifadə olunan IEEE 33-bus test şəbəkəsi əsasında təhlil aparılmışdır. Modeldə enerji sisteminə günəş pənnələri, külək turbinləri və enerji saxlanma sistemi inteqrasiya edilmişdir. Analizin əsas məqsədi müxtəlif optimallaşdırma metodlarının enerji itkiləri, hesablama müddəti və sistem sabitliyinə təsirini müqayisəli şəkildə qiymətləndirməkdən ibarət olmuşdur. Ənənəvi elektrik şəbəkələrində enerji axınının bir istiqamətli olması idarəetmə prosesini sadələşdirsə də, mikroşəbəkələrdə paylanmış enerji mənbələrinin iştirakı səbəbindən enerji axınları dəyişkən xarakter daşıyır. Günəş və külək enerjisinin qeyri-sabitliyi enerji balansının dinamik dəyişməsinə səbəb olur. Bu isə optimal idarəetmə modelinin seçilməsini zəruri edir [11, s.132]. Aparılan müqayisəli təhlildə xətti proqramlaşdırma, hissəcik sürüsü optimallaşdırması (PSO) və süni intellekt əsaslı metodların nəticələri qiymətləndirilmişdir.

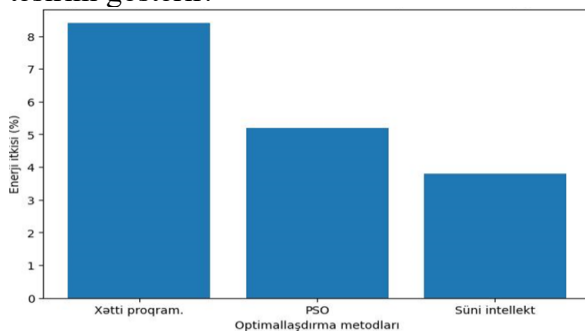
Cədvəl 1. Müxtəlif optimallaşdırma metodlarının müqayisəli nəticələri

Göstəricilər	Xətti proqramlaşdırma	PSO	Süni intellekt modeli
Enerji itkisi (%)	8.4	5.2	3.8
Hesablama müddəti (san.)	11.7	8.1	4.9
Gərginlik sabitliyi indeksi	0.82	0.89	0.95
Bərpa olunan enerji istifadəsi (%)	68	79	91

Cədvəldən göründüyü kimi, süni intellekt əsaslı model enerji itkilərinin minimumlaşdırılması baxımından daha yüksək nəticə göstərmişdir. Ənənəvi xətti proqramlaşdırma modelində enerji itkisi 8.4% təşkil etdiyi halda, PSO metodunda bu göstərici 5.2%-ə, süni intellekt modelində isə 3.8%-ə qədər azalmışdır. Bu vəziyyət optimallaşdırma alqoritmlərinin sistem parametrlərinə daha çevik uyğunlaşması ilə izah olunur [12, s.84]. Digər mühüm göstərici hesablama sürətidir. Mikroşəbəkələrdə qərarların real vaxt rejimində qəbul olunması böyük əhəmiyyət daşıdığından hesablama müddəti kritik parametr hesab edilir. Təhlil nəticələri göstərir ki, süni intellekt əsaslı yanaşmalar hesablama müddətini əhəmiyyətli dərəcədə azaldır. Bunun səbəbi sistemin əvvəlki məlumatlar əsasında öyrənmə qabiliyyətinə malik olmasıdır [13, s.217].

Gərginlik sabitliyi baxımından da metodlar arasında fərqlər müşahidə edilmişdir. Xüsusilə yüksək yüklənmə şəraitində ənənəvi yanaşmaların sistemin sabitliyini qorumaqda müəyyən çətinliklər yaratdığı müşahidə olunmuşdur. Süni intellekt modeli isə yük dəyişikliklərinə daha sürətli adaptasiya nümayiş etdirmişdir.

Aşağıdakı diaqram metodların enerji itkisinə təsirini göstərir:



Şəkil 2. Optimallaşdırma metodları üzrə enerji itkilərinin müqayisəsi

Nəticələr göstərir ki, mikroşəbəkələrdə enerji axınının optimallaşdırılması üçün hibrid və süni

intellekt əsaslı yanaşmalar daha yüksək effektivliyə malikdir. Xüsusilə bərpa olunan enerji mənbələrinin yüksək inteqrasiyası şəraitində adaptiv qərar qəbul etmə sistemləri enerji itkilərini azaltmaqla yanaşı enerji sisteminin dayanıqlığını və etibarlılığını da artırır [14, s.56].

Müzakirə

Aparılmış təhlilin nəticələri göstərir ki, mikroşəbəkələrdə enerji axınının idarə olunması ənənəvi elektrik şəbəkələri ilə müqayisədə daha mürəkkəb xarakter daşıyır. Bunun əsas səbəbi enerji istehsal mənbələrinin müxtəlifliyi, bərpa olunan enerji resurslarının dəyişkənliyi və enerji istehlakının dinamik şəkildə dəyişməsidir. Xüsusilə günəş və külək enerjisi kimi mənbələrin sistemə yüksək səviyyədə inteqrasiyası enerji axınlarının sabitliyinə birbaşa təsir göstərir. Bu səbəbdən mikroşəbəkələrdə enerji axınının optimallaşdırılması yalnız texniki məsələ deyil, həm də iqtisadi və idarəetmə baxımından kompleks problem hesab olunur.

Aparılan müqayisəli analiz nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, klassik optimallaşdırma metodları kiçik və sabit parametrlərə malik enerji sistemlərində qənaətbəxş nəticələr versə də, mürəkkəb və çoxsaylı dəyişənlərə malik mikroşəbəkələrdə onların tətbiq imkanları məhduqlaşır. Xətti və qeyri-xətti proqramlaşdırma metodları yüksək hesablama dəqiqliyinə malik olsa da, sistem ölçüsü artdıqca hesablama müddətinin uzanması və lokal optimal həllərin yaranması kimi problemlər müşahidə olunur.

Tədqiqat nəticələri metaevristik alqoritmlərin, xüsusilə hissəcik sürüsü optimallaşdırması və genetik alqoritmlərin enerji sistemlərində daha çevik işlədiyini göstərmişdir. Bu metodlar enerji itkilərinin azaldılması və sistem sabitliyinin qorunması baxımından klassik yanaşmalardan daha yüksək nəticələr nümayiş etdirmişdir. Bunun əsas səbəbi həmin alqoritmlərin geniş

həll məkanında qlobal optimal həllə yaxın nəticələr əldə etmək qabiliyyətinə malik olmasıdır. Bununla belə, bu metodlarda iterasiya sayının çoxluğu hesablama yükünü artırma bilər.

Aparılmış təhlildə ən yüksək nəticələrin süni intellekt əsaslı modellərdə müşahidə olunması xüsusi diqqət çəkir. Süni neyron şəbəkələri və dərin öyrənmə metodları enerji sistemində yaranan dəyişiklikləri əvvəlki məlumatlar əsasında öyrənərək qərar qəbul etmə prosesini daha çevik həyata keçirir. Xüsusilə enerji istehlakının proqnozlaşdırılması və enerji istehsalındakı qeyri-müəyyənliyin idarə olunmasında bu metodların effektivliyi daha aydın görünür. Süni intellekt yanaşmaları real vaxt rejimində adaptiv idarəetməni təmin etməsi baxımından mikroşəbəkələr üçün perspektiv istiqamət hesab olunur. Digər tərəfdən, yalnız bir optimallaşdırma metodundan istifadə edilməsi bütün hallarda yüksək nəticə verməyə bilər. Son illərin tədqiqatları göstərir ki, hibrid yanaşmalar - yəni metaevristik alqoritmlərlə süni intellekt texnologiyalarının inteqrasiyası - daha yüksək səmərəlilik yaradır. Belə yanaşmalar həm hesablama vaxtını azaldır, həm enerji itkilərini minimumlaşdırır, həm də enerji sisteminin dayanıqlığını artırır.

Beləliklə, aparılmış müzakirə göstərir ki, mikroşəbəkələrdə enerji axınının çoxmeyarlı optimallaşdırılması gələcək enerji sistemlərinin inkişaf istiqamətlərindən biri hesab olunur. Bu sahədə süni intellekt, maşın öyrənməsi və adaptiv idarəetmə texnologiyalarının tətbiqi enerji sistemlərinin daha təhlükəsiz, çevik və iqtisadi cəhətdən səmərəli fəaliyyət göstərməsinə geniş imkanlar yaradır.

Nəticə

Aparılmış tədqiqat nəticəsində mikroşəbəkələrdə enerji axınının çoxmeyarlı optimallaşdırılması məsələsinin müasir elektrik enerji sistemlərinin inkişafında mühüm elmi və praktiki əhəmiyyət daşıdığı müəyyən edilmişdir. Elektrik enerji sistemlərində bərpa olunan enerji mənbələrinin payının artması, enerji istehlakının dinamik dəyişməsi və enerji təhlükəsizliyi tələblərinin yüksəlməsi mikroşəbəkələrin daha səmərəli idarə edilməsini zəruri etmişdir. Bu şəraitdə enerji axınlarının optimal tənzimlənməsi enerji sistemlərinin dayanıqlı

fəaliyyəti üçün əsas məsələlərdən biri hesab olunur.

Tədqiqat zamanı mikroşəbəkələrdə enerji axınının optimallaşdırılmasının nəzəri əsasları araşdırılmış və bu sahədə dünya alimlərinin apardıqları fundamental tədqiqatlar təhlil edilmişdir. Müəyyən olunmuşdur ki, enerji sistemlərinin inkişafı klassik yük axını modellərindən başlayaraq optimal güc axını, çoxmeyarlı qərar qəbul etmə və süni intellekt əsaslı idarəetmə metodlarına qədər geniş təkamül yolu keçmişdir.

Təhlillər göstərmişdir ki, enerji sistemlərində istifadə olunan klassik optimallaşdırma metodları müəyyən üstünlüklərə malik olsa da, dəyişkən xarakterli və çoxparametrlı mikroşəbəkələrdə onların tətbiq imkanları məhdudlaşır. Xüsusilə bərpa olunan enerji mənbələrinin yüksək inteqrasiyası şəraitində sistemdə yaranan qeyri-müəyyənliklər klassik metodların effektivliyini azaldır.

Aparılmış müqayisəli analiz nəticəsində metaevristik və süni intellekt əsaslı optimallaşdırma metodlarının daha yüksək nəticələr verdiyi müəyyən edilmişdir. Hissəcik sürüsü optimallaşdırması, genetik alqoritmlər, süni neyron şəbəkələri və dərin öyrənmə metodları enerji itkilərinin azaldılması, hesablama sürətinin artırılması və sistem dayanıqlığının qorunması baxımından daha effektiv nəticələr nümayiş etdirmişdir.

Tədqiqat nəticələri göstərmişdir ki, enerji axınının optimallaşdırılması zamanı yalnız bir parametrin deyil, bir neçə texniki və iqtisadi göstəricinin paralel şəkildə nəzərə alınması daha optimal qərarların qəbul edilməsinə imkan yaradır. Çoxmeyarlı optimallaşdırma yanaşmaları enerji sistemlərində enerji xərclərinin azaldılması, enerji keyfiyyətinin yüksəldilməsi və sistem etibarlılığının artırılması baxımından mühüm üstünlüklərə malikdir.

Nəticə etibarilə müəyyən edilmişdir ki, mikroşəbəkələrdə enerji axınının çoxmeyarlı optimallaşdırılması gələcək ağıllı enerji sistemlərinin əsas inkişaf istiqamətlərindən biri hesab olunur. Süni intellekt, maşın öyrənməsi və hibrid optimallaşdırma texnologiyalarının tətbiqi mikroşəbəkələrin daha dayanıqlı, adaptiv və yüksək səmərəli fəaliyyət göstərməsinə imkan yaradacaqdır. Bu istiqamətdə gələcək tədqiqatların real vaxt rejimində idarəetmə sistemləri, rəqəmsal

əkiliz texnologiyaları və proqnozlaşdırma modelləri əsasında inkişaf etdirilməsi məqsəda uyğun hesab olunur.

ƏDƏBİYYAT SİYAHISI

1. Tinney W.F., Hart C.E. Power Flow Solution by Newton's Method // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. -1967. - Vol. 86, №11. - p. 1449-1460.
2. Dommel H.W., Tinney W.F. Optimal Power Flow Solutions // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. - 1968. - Vol. PAS-87, №10. - p. 1866-1876.
3. Lasseter R.H. MicroGrids // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. – New York, USA, 2002. – Vol. 1. – p. 305-308.
4. Shahidehpour M., Hatziargyriou N., Li Z., Bahramirad S. Microgrids: Architectures and Control. – Wiley-IEEE Press, 2017. – 536 p.
5. Pareto V. Manual of Political Economy. – Oxford University Press, 1971. – 504 p.
6. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. – Perth, Australia, 1995. – p. 1942-1948.
7. Hatziargyriou N. Microgrids: Architectures and Control. – Wiley-IEEE Press, 2014. - 485 p.
8. Momoh J.A. Electric Power System Applications of Optimization. - CRC Press, New York, 2009. – 672 p.
9. Wood A.J., Wollenberg B.F., Sheblé G.B. Power Generation, Operation and Control. – New York: John Wiley & Sons, 2014. - 656 p.
10. Holland J.H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. - MIT Press, Cambridge, 1992. – 211 p.
11. Kundur P. Power System Stability and Control. - McGraw-Hill Education, New York, 1994. – 1176 p.
12. Mohammadi M., Soleymani S., Mozafari B. Scenario-Based Stochastic Operation Management of Microgrid Including Wind, Photovoltaic, Micro-Turbine and Fuel Cell Using Modified Particle Swarm Optimization Algorithm // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. -Vol. 26. - p. 236-247.
13. Siano P. Demand Response and Smart Grids: A Survey // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 30. – p. 461-478.
14. Olivares D.E., Mehrizi-Sani A., Etemadi A.H. et al. Trends in Microgrid Control // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2014. - Vol. 5, №4. – p. 1905-1919.
15. Lasseter R.H., Piagi P. Microgrid: A Conceptual Solution // IEEE Power Electronics Specialists Conference. – Aachen, Germany, 2004. - p. 4285-4290.
16. Mamedova, G. V., Nuraliyeva R. N., Mammadova Z. (2025) Investments in Azerbaijan's electricity sector: Equilibrium price and marginal cost function. Applications of Mathematics in Science and Technology, Green taxonomy for sustainable development: From Green Technologies to Green Economypp. 81-87. <https://www.routledge.com/Applications-of-Mathematics-in-Science-and-Technology/Hung-Sekar-ESI-Kumar/p/book/9781003606659>

ГЛОБАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ТРАНСПОРТНО ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АЗЕРБАЙДЖАНА

Халид Гадир САДЫЗАДЕ 

Азербайджанский технический университет

E-mail: xalidsedi@gmail.com

Резюме: В статье исследуются теоретические и практические аспекты методов многокритериальной оптимизации управления потоками энергии в микросетях. Стремительное развитие возобновляемых источников энергии и широкое внедрение распределённых энергетических ресурсов в современных электроэнергетических системах обусловили появление новых подходов к управлению энергетическими системами. Микросети играют важную роль в повышении энергетической безопасности, качества электроснабжения и надёжности энергосистем. В рамках исследования проанализированы теоретические основы оптимизации потоков энергии, классические методы

оптимизации, метаэвристические алгоритмы, а также подходы, основанные на технологиях искусственного интеллекта. Полученные результаты показывают, что алгоритм роя частиц, генетические алгоритмы и модели искусственного интеллекта демонстрируют более высокую эффективность по сравнению с линейным программированием и другими традиционными методами. Сравнительный анализ показал, что подходы, основанные на искусственном интеллекте, обеспечивают лучшие результаты в снижении потерь энергии, повышении вычислительной эффективности и поддержании устойчивости системы. Результаты исследования свидетельствуют о том, что методы многокритериальной оптимизации будут играть ключевую роль в дальнейшем развитии интеллектуальных энергетических систем.

Ключевые слова: микросеть, потоки энергии, многокритериальная оптимизация, интеллектуальная энергосистема, искусственный интеллект.

DEVELOPMENT OF MULTI OBJECTIVE ENERGY FLOW OPTIMIZATION METHODS FOR MICROGRIDS

Khalid Gadir SADIZADE 
Azerbaijan Technical University
E-mail: xalidsedi@gmail.com

Abstract: This article investigates the theoretical and practical aspects of multi-objective optimization methods for power flow management in microgrids. The rapid development of renewable energy sources and the increasing use of distributed energy resources in modern electric power systems have led to the emergence of new approaches in energy system management. Microgrids play a significant role in improving energy security, power quality, and system reliability. Within the framework of the study, the theoretical foundations of power flow optimization, classical optimization methods, metaheuristic algorithms, and artificial intelligence-based approaches were analyzed. The findings indicate that particle swarm optimization, genetic algorithms, and artificial intelligence models demonstrate higher efficiency compared to linear programming and other traditional methods. Comparative analysis revealed that artificial intelligence-based approaches provide better results in reducing energy losses, increasing computational efficiency, and maintaining system stability. The results of the study suggest that multi-objective optimization approaches will play an essential role in the future development of intelligent energy systems.

Keywords: microgrid, power flow, multi-objective optimization, smart grid, artificial intelligence