

TƏBİƏT VƏ TEXNİKA ELMLƏRİ BÖLMƏSİ<https://doi.org/10.67471/NREE2553>**ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLƏRİNDƏ GƏRGİNLİK REJİMLƏRİNİN
OPTİMALLAŞDIRILMASI: ENERJİ SƏMƏRƏLİLİYİ VƏ DAYANIQLI İNKİŞAF
KONTEKSTİNDƏ TƏHLİL****^{1,2,4}Liliya Çingiz qızı Süleymanova, ^{1,3,4}Ülkər İzzət qızı Aşurova**¹texnika üzrə fəlsəfə doktoru²liliya.suleymanova@mdu.edu.az,³ulkar.ashurova@mdu.edu.az⁴Mingəçevir Dövlət Universiteti

Xülasə: Elektrik enerjisi müasir iqtisadiyyatın və cəmiyyətin dayanıqlı inkişafını təmin edən əsas strateji resurslardan biridir. Elektrik enerji sistemlərinin etibarlı, təhlükəsiz və iqtisadi cəhətdən səmərəli istismarı isə elektrik şəbəkələrində gərginlik rejimlərinin optimal idarə olunmasından birbaşa asılıdır. Gərginliyin normativ hədlərdən kənara çıxması aktiv enerji itkilərinin artmasına, elektrik enerjisinin keyfiyyət göstəricilərinin pisləşməsinə, elektrik avadanlıqlarının istismar müddətinin azalmasına, həmçinin enerji sisteminin etibarlılığının zəifləməsinə səbəb olur. Məqalədə elektrik enerji sistemlərində gərginlik rejimlərinin optimallaşdırılmasının nəzəri və metodoloji əsasları sistemli şəkildə təhlil edilmiş, gərginlik tənzimlənməsinin enerji səmərəliliyinə, elektrik enerjisinin keyfiyyətinə və enerji sistemlərinin dayanıqlığına təsiri qiymətləndirilmişdir. Tədqiqat çərçivəsində yük altında gərginlik tənzimləyən transformatorların (OLTC), reaktiv gücün kompensasiyası vasitələrinin, çevik alternativ cərəyan ötürmə sistemlərinin (FACTS) və Smart Grid texnologiyalarının tətbiq imkanları müqayisəli şəkildə araşdırılmışdır. Eyni zamanda rəqəmsal idarəetmə sistemləri, SCADA platformaları və süni intellekt əsaslı idarəetmə alqoritmlərinin enerji itkilərinin azaldılması, gərginlik sabitliyinin təmin olunması və karbon emissiyalarının minimuma endirilməsində rolu qiymətləndirilmişdir.

Açar sözlər: elektrik enerji sistemi, gərginlik rejimi, gərginliyin optimallaşdırılması, enerji səmərəliliyi, reaktiv gücün kompensasiyası, FACTS texnologiyaları, Smart Grid, dayanıqlı inkişaf

1. Giriş

Qlobal enerji sektorunda baş verən texnoloji dəyişikliklər, elektrik enerjisinə olan tələbatın davamlı artması və bərpa olunan enerji mənbələrinin geniş tətbiqi elektrik enerji sistemlərinin idarə olunmasına yeni yanaşmaların tətbiqini zəruri etmişdir [1,2]. Müasir enerji sistemlərinin əsas məqsədi yalnız elektrik enerjisinin fasiləsiz ötürülməsi deyil, həm də enerji keyfiyyətinin təmin olunması, texniki itkilərin minimuma endirilməsi və enerji resurslarından maksimum səmərəliliklə istifadə edilməsidir [3].

Elektrik enerjisinin keyfiyyətini müəyyən edən əsas göstəricilərdən biri gərginlik səviyyəsinin standartlarla müəyyən edilmiş hədlər daxilində saxlanılmasıdır. Gərginlik rejiminin pozulması elektrik avadanlıqlarının normal iş rejiminə mənfi təsir göstərməklə yanaşı, aktiv və reaktiv güc balansının dəyişməsinə, ötürmə xətlərində enerji itkilərinin artmasına, transformatorların əlavə yüklənməsinə və bütövlükdə elektrik enerji sisteminin dayanıqlığının azalmasına səbəb olur [4, 6].

Son illərdə günəş və külək elektrik stansiyalarının enerji sistemlərində payının artması gərginlik rejimlərinin idarə edilməsini daha mürəkkəb etmişdir. Bu enerji mənbələrinin istehsal gücünün meteoroloji şəraitdən asılı olaraq dəyişməsi şəbəkədə gərginlik fluktuasiyalarının yaranmasına səbəb

olur. Belə şəraitdə yalnız ənənəvi idarəetmə üsullarından istifadə kifayət etmir və real vaxt rejimində işləyən intellektual idarəetmə sistemlərinin tətbiqi xüsusi aktuallıq qazanır [7, 8].

Müasir enerji sistemlərində Smart Grid texnologiyaları, SCADA sistemləri, FACTS qurğuları, reaktiv güc kompensasiyası vasitələri və yük altında gərginlik tənzimləyən transformatorlar gərginlik rejimlərinin optimallaşdırılmasında mühüm rol oynayır. Bu texnologiyalar elektrik şəbəkəsinin çevikliyini artırmaqla yanaşı, enerji itkilərinin azaldılmasına, elektrik enerjisinin keyfiyyətinin yüksəldilməsinə və enerji sisteminin etibarlılığının artırılmasına imkan yaradır [5, 9, 10].

Elektrik şəbəkələrində gərginlik rejimlərinin optimallaşdırılması yalnız texniki məsələ deyil, həm də iqtisadi və ekoloji baxımdan strateji əhəmiyyət kəsb edir. Aktiv enerji itkilərinin azaldılması əlavə generasiya güclərinə olan tələbatı azaldır, yanacaq sərfiyyatını minimuma endirir və istixana qazı emissiyalarının azalmasına şərait yaradır. Bu səbəbdən optimal gərginlik idarəetməsi enerji təhlükəsizliyinin təmin olunması və dayanıqlı inkişaf strategiyalarının həyata keçirilməsinin əsas elementlərindən biri hesab olunur [11, 12].

2. Problemin qoyuluşu

Elektrik enerji sistemlərinin etibarlı və dayanıqlı fəaliyyəti üçün şəbəkənin bütün qovşaqlarında gərginliyin normativ hədlərdə saxlanılması əsas texniki tələblərdən biridir. Lakin real istismar şəraitində müxtəlif texniki və istismar amilləri gərginlik rejiminin pozulmasına səbəb olur.

Gərginlik rejimlərinə mənfi təsir göstərən əsas amillər aşağıdakılardır:

- yük qrafiklərinin sutka və mövsüm ərzində dəyişməsi;
- reaktiv güc balansının pozulması;
- ötürmə və paylayıcı xətlərdə gərginlik düşgünlərinin yaranması;
- transformatorların normadan artıq yüklənməsi;
- bərpa olunan enerji mənbələrinin dəyişkən generasiya gücü;
- qeyri-xətti və impuls xarakterli istehlakçı yüklərinin artması;
- elektrik şəbəkəsinin qeyri-optimal topologiyası.

Sadələnmə amillərinin təsiri nəticəsində aşağıdakı problemlər meydana çıxır:

- aktiv enerji itkilərinin artması;
- elektrik enerjisinin keyfiyyət göstəricilərinin pisləşməsi;
- transformator və digər elektrik avadanlıqlarının istismar müddətinin qısalması;
- qəza və fəvqəladə rejimlərin yaranma ehtimalının yüksəlməsi;
- elektrik təchizatının etibarlılığının azalması;
- enerji müəssisələrinin iqtisadi xərclərinin artması.

Bu problemlərin aradan qaldırılması məqsədilə müasir elektrik enerji sistemlərində gərginlik və reaktiv gücün koordinasiya idarə olunması, FACTS texnologiyalarının tətbiqi, Smart Grid platformalarının istifadəsi və süni intellekt əsaslı optimallaşdırma alqoritmlərinin işlənilməsi hazırlanması xüsusi aktuallıq kəsb edir.

3. Tədqiqatın məqsədi

Tədqiqatın əsas məqsədi elektrik enerji sistemlərində gərginlik rejimlərinin optimallaşdırılması üsullarının elmi əsaslarının araşdırılması, onların enerji səmərəliliyinə, elektrik enerjisinin keyfiyyətinə, sistemin etibarlılığına və dayanıqlı inkişaf göstəricilərinə təsirinin kompleks şəkildə qiymətləndirilməsidir.

Bu məqsədə nail olmaq üçün aşağıdakı elmi vəzifələr müəyyən edilmişdir:

- elektrik enerji sistemlərində gərginlik rejimlərinin formalaşmasının nəzəri əsaslarının təhlili;
- gərginliyin tənzimlənməsi üsullarının texniki-iqtisadi baxımdan müqayisəli qiymətləndirilməsi;
- reaktiv güc kompensasiyasının enerji itkilərinə və gərginlik sabitliyinə təsirinin araşdırılması;

- FACTS texnologiyalarının və Smart Grid platformalarının tətbiq imkanlarının qiymətləndirilməsi;
- rəqəmsal idarəetmə sistemləri və süni intellekt alqoritmlərinin gərginlik optimallaşdırılmasında rolunun müəyyən edilməsi;
- enerji səmərəliliyinin artırılması və karbon emissiyalarının azaldılması baxımından optimal gərginlik idarəetməsinin dayanıqlı inkişaf məqsədlərinə töhfəsinin əsaslandırılması.

4. Elektrik Enerji Sistemlərində Gərginlik Rejimlərinin Nəzəri Əsasları

Elektrik enerji sistemlərində gərginlik rejimi dedikdə elektrik şəbəkəsinin bütün qovşaqlarında gərginlik qiymətlərinin zaman üzrə dəyişməsi, onların paylanması və normativ hədlər daxilində saxlanması başa düşülür. Gərginlik rejimi enerji sisteminin texniki vəziyyətini xarakterizə edən əsas istismar göstəricilərindən biridir və sistemin etibarlılığı, təhlükəsizliyi, enerji keyfiyyəti, iqtisadi səmərəliliyi və elektromaqnit uyğunluğu ilə birbaşa əlaqədardır.

Enerji sistemlərində aktiv və reaktiv güc balansının pozulması, yükün qeyri-bərabər paylanması, ötürücü xətlərin uzunluğu, transformatorların yüklənməsi, istehlakçıların xarakteristikaları və bərpa olunan enerji mənbələrinin dəyişkən istehsalı gərginlik rejiminə əhəmiyyətli təsir göstərən amillər hesab olunur. Xüsusilə yüksək gərginlikli ötürücü şəbəkələrdə reaktiv gücün qeyri-kafi kompensasiyası gərginlik düşgüsünə, ötürmə qabiliyyətinin azalmasına və sistemin statik dayanıqlığının zəifləməsinə səbəb olur.

Elektrik enerjisinin keyfiyyəti üzrə beynəlxalq standartlara (IEC 60038, EN 50160 və IEEE 1159) əsasən paylayıcı şəbəkələrdə gərginliyin nominal qiymətdən adətən $\pm 5-10\%$ həddində saxlanması tövsiyə edilir. Bu hədlərin aşılması elektrik mühərriklərinin qızmasına, transformatorların əlavə itkilərlə işləməsinə, elektron avadanlıqların nasazlığına və istehlakçıların texnoloji proseslərinin pozulmasına səbəb ola bilər.

Elektrik enerji sistemlərində gərginlik rejimi əsasən aşağıdakı amillərdən asılıdır:

- aktiv və reaktiv yükün dəyişməsi;
- ötürücü xətlərin uzunluğu, induktivliyi və aktiv müqaviməti;
- transformatorların yüklənmə səviyyəsi və transformasiya əmsalı;
- elektrik şəbəkəsinin topologiyası;
- generatorların həyəcanlandırma sistemlərinin işi;
- reaktiv güc balansı;
- paylanmış generasiya və bərpa olunan enerji mənbələrinin inteqrasiyası;
- istehlak qrafiklərinin sutkalıq və mövsümi dəyişməsi.

Müasir enerji sistemlərində günəş və külək elektrik stansiyalarının geniş tətbiqi gərginlik rejiminin idarə edilməsini daha mürəkkəb etmişdir. Bu mənbələrin istehsal gücü meteoroloji şəraitdən asılı olduğundan şəbəkədə reaktiv güc balansı daim dəyişir. Bu isə adaptiv idarəetmə sistemlərinin, rəqəmsal monitorinq vasitələrinin və çevik kompensasiya qurğularının tətbiqini zəruri edir.

Gərginlik sabitliyi elektrik enerji sisteminin dinamik dayanıqlığının mühüm komponentlərindən biridir. Gərginliyin kritik səviyyədən aşağı düşməsi nəticəsində gərginlik kollapsı (Voltage Collapse) baş verə bilər ki, bu da genişmiqyaslı enerji kəsilmələrinə səbəb olan ən təhlükəli qəza proseslərindən hesab edilir. Buna görə müasir elektrik sistemlərində gərginlik və reaktiv gücün koordinasiya ilə idarə olunması enerji təhlükəsizliyinin əsas istiqamətlərindən biri kimi qəbul edilir.

5. Gərginliyin Optimallaşdırılması Üsulları

Elektrik enerji sistemlərində optimal gərginlik rejiminin təmin olunması enerji itkilərinin minimuma endirilməsi, elektrik enerjisinin keyfiyyətinin yüksəldilməsi və avadanlıqların istismar müddətinin artırılması baxımından mühüm əhəmiyyət kəsb edir. Müasir enerji sistemlərində bu məqsədlə klassik və rəqəmsal idarəetmə üsullarının kombinasiyasından istifadə edilir.

a) Transformatorların yük altında gərginlik tənzimlənməsi (OLTC)

Yük altında tənzimlənən transformatorlar (On-Load Tap Changer – OLTC) enerji sistemlərində gərginlik səviyyəsinin avtomatik saxlanılmasını təmin edən ən geniş yayılmış texniki vasitələrdən biridir. OLTC mexanizmi transformatorun transformasiya əmsalını enerji verilişini dayandırmadan dəyişməyə imkan verir. Bunun nəticəsində müxtəlif yüklənmə şəraitində çıxış gərginliyi normativ hədlər daxilində saxlanılır.

OLTC sistemlərinin avtomatik idarə olunması müasir mikroprosessor relələri və SCADA sistemləri vasitəsilə həyata keçirilir. Bu qurğular real vaxt rejimində gərginlik dəyişmələrini analiz edərək optimal pilləni seçirlər.

Bu texnologiyanın əsas üstünlükləri aşağıdakılardır:

- enerji keyfiyyətinin yüksəldilməsi;
- gərginlik dəyişmələrinin minimuma endirilməsi;
- istehlakçıların fasiləsiz enerji ilə təmin olunması;
- transformatorların istismar müddətinin uzadılması;
- enerji itkilərinin azaldılması;
- elektrik avadanlıqlarının etibarlılığının artırılması.

b) Reaktiv Gücün Kompensasiyası

Reaktiv güc elektrik enerji sistemlərinin normal fəaliyyətinin təmin edilməsində əsas parametrlərdən biridir. Reaktiv güc faydalı iş görməsə də elektromaqnit sahələrinin yaranması üçün zəruridir. Bununla belə, onun normadan artıq olması ötürücü xətlərdə əlavə cərəyan yaradır və aktiv enerji itkilərini artırır.

Reaktiv gücün düzgün idarə olunması aşağıdakı texniki vasitələrlə həyata keçirilir:

- kondensator batareyaları;
- şunt reaktorları;
- sinxron kompensatorlar;
- STATCOM sistemləri;
- SVC (Static Var Compensator);
- SVG (Static Var Generator).

Bu qurğuların tətbiqi nəticəsində gərginlik səviyyəsi stabilləşir, güc əmsalı yüksəlir, cərəyan azalır, transformatorların yüklənməsi azalır, xətt üzrə aktiv enerji itkiləri minimuma enir, enerji ötürmə qabiliyyəti artır.

Reaktiv gücün optimal paylanması nəticəsində elektrik şəbəkələrinin iqtisadi səmərəliliyi əhəmiyyətli dərəcədə yüksəlir və enerji sisteminin etibarlılığı artır.

c) FACTS Texnologiyaları

Flexible AC Transmission Systems (FACTS) müasir güc elektronika əsasında yaradılmış çevik idarəetmə sistemləridir. FACTS qurğuları elektrik şəbəkəsində gərginliyin, reaktiv gücün və güc axınlarının real vaxt rejimində tənzimlənməsinə imkan verir.

Ən geniş tətbiq olunan FACTS qurğuları aşağıdakılardır:

- STATCOM;
- SVC;
- TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor);
- UPFC (Unified Power Flow Controller);
- TCPAR;
- IPFC.

Bu texnologiyaların tətbiqi nəticəsində gərginlik dəyişmələri azalır, enerji sisteminin statik və dinamik dayanıqlığı artır, qəza hallarının yayılması məhdudlaşdırılır, ötürmə xətlərinin yüklənməsi optimallaşdırılır, enerji ötürmə qabiliyyəti artır, bərpa olunan enerji mənbələrinin integrasiyası asanlaşır.

Son illərdə FACTS texnologiyaları yüksək gərginlikli elektrik şəbəkələrinin rəqəmsal transformasiyasının əsas elementlərindən biri hesab olunur.

6. Riyazi Model

Elektrik enerji sistemlərində gərginlik rejiminin optimallaşdırılması əsasən aktiv və reaktiv güc axınlarının riyazi modelləri əsasında həyata keçirilir. Güc axınlarının düzgün hesablanması enerji itkilərinin qiymətləndirilməsi və optimal idarəetmə qərarlarının qəbul edilməsi üçün mühüm əhəmiyyət daşıyır.

Xətt üzrə aktiv enerji itkiləri aşağıdakı ifadə ilə müəyyən edilir:

$$P_{itki} = I^2 R$$

burada:

P_{itki} – aktiv enerji itkisi (W);

I – xətt üzrə cərəyan (A);

R – xəttin aktiv müqaviməti (Ω).

Üçfazlı elektrik sistemində aktiv güc

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$$

ifadəsi ilə hesablanır.

Buradan cərəyan

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi}$$

şəklində müəyyən edilir.

Bu ifadələri birləşdirdikdə aktiv enerji itkiləri üçün aşağıdakı nəticə alınır:

$$P_{itki} = R \left(\frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} \right)^2$$

və ya

$$P_{itki} = \frac{P^2 R}{3 U^2 \cos^2 \varphi}$$

Bu düstur göstərir ki:

- gərginlik artdıqca enerji itkiləri kvadratik qanun üzrə azalır;
- güc əmsalının yaxşılaşdırılması enerji səmərəliliyini yüksəldir;
- reaktiv gücün kompensasiyası xətt üzrə cərəyanı azaldır;
- müqavimətin azaldılması enerji itkilərinin minimuma endirilməsinə imkan verir.

Buna görə elektrik enerji sistemlərinin optimallaşdırılmasında yüksək gərginlikli ötürmə xətlərindən istifadə, reaktiv güc kompensasiyası və optimal güc axını (Optimal Power Flow – OPF) alqoritmləri geniş tətbiq olunur.

7. Smart Grid Texnologiyalarının Rolu

Rəqəmsallaşma prosesinin sürətlənməsi nəticəsində Smart Grid konsepsiyası elektrik enerji sistemlərinin idarə olunmasında keyfiyyətcə yeni mərhələ yaratmışdır. Smart Grid ənənəvi elektrik şəbəkələrini informasiya-kommunikasiya texnologiyaları, avtomatlaşdırılmış idarəetmə sistemləri və süni intellekt alqoritmləri ilə birləşdirərək enerji sisteminin daha çevik, etibarlı və səmərəli fəaliyyətini təmin edir.

Smart Grid texnologiyalarının əsas funksiyalarına aşağıdakılar daxildir:

- real vaxt rejimində monitorinq və diaqnostika;
- avtomatik gərginlik və tezlik tənzimlənməsi;
- yükün qısamüddətli və uzunmüddətli proqnozlaşdırılması;
- enerji axınlarının optimallaşdırılması;
- qəzaların erkən aşkarlanması və lokallaşdırılması;
- mikroşəbəkələrin (Microgrid) idarə olunması;
- enerji saxlama sistemlərinin koordinasiyası;

- elektrik nəqliyyat vasitələrinin integrasiyası;
- bərpa olunan enerji mənbələrinin səmərəli idarə olunması.

Smart Grid sistemlərində SCADA, PMU (Phasor Measurement Unit), IoT sensorları və ağıllı sayğaclarıdan əldə olunan böyük həcmli məlumatlar süni intellekt və maşın öyrənməsi alqoritmləri vasitəsilə emal edilir. Bu yanaşma gərginlik dəyişmələrinin əvvəlcədən proqnozlaşdırılmasına, optimal reaktiv güc paylanması müəyyən edilməsinə və enerji itkilərinin minimuma endirilməsinə imkan verir.

Son illərdə Deep Learning, Reinforcement Learning və Digital Twin texnologiyalarının Smart Grid sistemlərinə integrasiyası elektrik enerji sistemlərində adaptiv idarəetmənin inkişafına mühüm töhfə vermişdir. Bu texnologiyalar qeyri-müəyyən iş rejimlərində belə optimal idarəetmə qərarlarının qəbulunu təmin edir, enerji sisteminin dayanıqlığını artırır və karbon emissiyalarının azaldılmasına xidmət edir.

Beləliklə, Smart Grid texnologiyaları gərginlik rejimlərinin optimallaşdırılmasının, enerji səmərəliliyinin yüksəldilməsinin və dayanıqlı enerji sistemlərinin formalaşdırılmasının əsas istiqamətlərindən biri hesab olunur. Müasir tədqiqatlar göstərir ki, rəqəmsal idarəetmə sistemlərinin tətbiqi enerji itkilərinin azalmasına, elektrik enerjisinin keyfiyyətinin yüksəldilməsinə və elektrik şəbəkələrinin etibarlılığının əhəmiyyətli dərəcədə artırılmasına şərait yaradır.

8. Dayanıqlı İnkişaf Baxımından Qiymətləndirmə

Elektrik enerji sistemlərində gərginlik rejimlərinin optimallaşdırılması yalnız texniki göstəricilərin yaxşılaşdırılmasına yönəlmiş tədbir deyil, həm də enerji sektorunda dayanıqlı inkişaf prinsiplərinin həyata keçirilməsinə xidmət edən strateji yanaşmadır. Enerji istehsalı, ötürülməsi və paylanması mərhələlərində texniki itkilərin azaldılması enerji resurslarından daha səmərəli istifadəni təmin etməklə yanaşı, ətraf mühitə mənfi təsirlərin minimuma endirilməsinə də şərait yaradır.

Gərginlik rejiminin optimal idarə olunması nəticəsində ötürücü və paylayıcı şəbəkələrdə cərəyanın azalması aktiv enerji itkilərinin kvadratik qanun üzrə azalmasına səbəb olur. Bu isə elektrik enerjisinin istehsalı üçün tələb olunan ilkin enerji resurslarının həcmi azaldır və nəticədə istilik elektrik stansiyalarında yanacaq sərfinin aşağı düşməsinə gətirib çıxarır. Yanacaq sərfinin azalması isə karbon qazı (CO₂), azot oksidləri (NO_x), kükürd oksidləri (SO_x) və digər istixana qazlarının atmosfərə atılmasının azalmasına şərait yaradır.

Gərginlik optimallaşdırılması aşağıdakı istiqamətlər üzrə dayanıqlı inkişafın təmin olunmasına mühüm töhfə verir:

- elektrik enerjisinin texniki itkilərinin azaldılması;
- enerji səmərəliliyinin yüksəldilməsi;
- elektrik avadanlıqlarının istismar müddətinin uzadılması;
- karbon emissiyalarının azaldılması;
- enerji resurslarından rəşional istifadə;
- elektrik enerjisinin keyfiyyətinin yüksəldilməsi;
- bərpa olunan enerji mənbələrinin təhlükəsiz integrasiyası;
- enerji sisteminin dayanıqlığının və etibarlılığının artırılması;
- yeni generasiya güclərinə olan investisiya ehtiyacının azaldılması;
- milli enerji təhlükəsizliyinin möhkəmləndirilməsi.

Müasir enerji siyasətində gərginlik rejimlərinin optimallaşdırılması BMT-nin Dayanıqlı İnkişaf Məqsədləri (Sustainable Development Goals – SDGs) ilə sıx əlaqələndirilir. Xüsusilə aşağıdakı məqsədlərin həyata keçirilməsinə birbaşa töhfə verir:

- SDG 7 – Əlçatan və Təmiz Enerji: enerji səmərəliliyinin artırılması və enerji infrastrukturunun modernləşdirilməsi;
- SDG 9 – Sənaye, İnnovasiya və İnfrastruktur: rəqəmsal enerji şəbəkələrinin və innovativ idarəetmə texnologiyalarının tətbiqi;

- SDG 11 – Dayanıqlı Şəhərlər və İcmalar: ağıllı şəhər enerji sistemlərinin inkişafı;
- SDG 12 – Məsuliyyətli İstehsal və İstehlak: enerji resurslarının səmərəli istifadəsi;
- SDG 13 – İqlim Dəyişikliklərinə Qarşı Mübarizə: karbon emissiyalarının və ekoloji təsirlərin azaldılması.

Beləliklə, gərginlik rejimlərinin optimallaşdırılması yalnız elektrik şəbəkələrinin texniki göstəricilərini yaxşılaşdırmır, həm də yaşıl enerji keçidinin və karbon neytrallığı strategiyalarının həyata keçirilməsində mühüm rol oynayır.

9. Nümunə Hesablamalar və Nəticələrin Təhlili

a) Tədqiqat ssenarisi

Gərginlik rejiminin optimallaşdırılmasının enerji itkilərinə və enerji səmərəliliyinə təsirini qiymətləndirmək məqsədilə 35/10 kV-luq paylayıcı şəbəkənin tipik bir hissəsi üzrə modelləşdirmə əsasında nümunə hesablamalar aparılmışdır. Hesablamalar üç müxtəlif istismar rejimi üçün müqayisəli şəkildə yerinə yetirilmişdir:

1. Ənənəvi istismar rejimi (reaktiv güc kompensasiyası tətbiq olunmur);
2. Kondensator batareyalarının tətbiqi ilə kompensasiya edilmiş rejim;
3. Smart Grid əsaslı adaptiv avtomatik gərginlik idarəetmə sistemi.

Cədvəl 1

Hesablama üçün qəbul edilmiş başlanğıc parametrlər

Göstərici	Qiymət
Nominal gərginlik	10 kV
Aktiv güc	5 MW
Güc əmsalı	0,85
Xəttin aktiv müqaviməti	0,8 Ω
Xəttin uzunluğu	15 km
Şəbəkə tipi	Üçfazlı

Bu parametrlər orta güclü sənaye və şəhər paylayıcı şəbəkələri üçün xarakterik hesab edilə bilər.

b) Cərəyanın hesablanması

Üçfazlı elektrik şəbəkəsində xətt cərəyanı aşağıdakı ifadə ilə müəyyən edilir:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi}$$

Verilənlər: $P = 5 \times 10^6$ W, $U = 10 \times 10^3$ V, $\cos \varphi = 0.85$

Hesablama nəticəsində

$$I \approx 340 \text{ A}$$

alınır.

Bu nəticə göstərir ki, reaktiv gücün böyük olması səbəbindən şəbəkədə cərəyan yüksək qiymət alır və bu da enerji itkilərinin artmasına səbəb olur.

c) Aktiv enerji itkilərinin hesablanması

Üçfazlı elektrik şəbəkəsində aktiv enerji itkiləri

$$P_{itki} = 3I^2R$$

ifadəsi ilə müəyyən edilir.

Burada $I=340\text{A}$, $R=0.8\Omega$ olduqda

$$P_{itki} \approx 277 \text{ kW}$$

alınır.

Reaktiv güc kompensasiyasından sonra güc əmsalı $0.85 \rightarrow 0.97$ olduqda xətt üzrə cərəyan təxminən 299 A olur və aktiv enerji itkiləri

$$P_{itki} \approx 215 \text{ kW}$$

səviyyəsinə enir.

Beləliklə, cərəyan təxminən 12 %, aktiv enerji itkiləri isə 22–24 % azalır.

Smart Grid əsaslı avtomatik idarəetmə tətbiq edildikdə isə yükün dəyişməsinə uyğun adaptiv tənzimləmə nəticəsində enerji itkilərinin əlavə olaraq 5–8 % azalması mümkündür.

10. Nəticələrin Müqayisəli Təhlili

Cədvəl 2

Müxtəlif idarəetmə üsullarının müqayisəsi

Göstərici	Ənənəvi	Kondensator	Smart Grid
Gərginlik sabitliyi	Orta	Yüksək	Çox yüksək
Aktiv enerji itkiləri	100 %	78–82 %	72–76 %
Güc əmsali	0,85	0,97	0,99
Enerji keyfiyyəti	Orta	Yüksək	Çox yüksək
Qəza riski	Orta	Aşağı	Minimal
Avtomatlaşdırma	Əl ilə	Yarımavtomatik	Tam avtomatik
Enerji səmərəliliyi	Orta	Yüksək	Maksimum

Müqayisə göstərir ki, Smart Grid texnologiyalarının tətbiqi yalnız enerji itkilərini azaltmır, həm də sistemin elastikliyi, etibarlılığını və enerji keyfiyyətini əhəmiyyətli dərəcədə yüksəldir.

11. Müzakirə

Aparılmış nəzəri və hesablama təhlilləri göstərir ki, gərginlik rejimlərinin optimallaşdırılması elektrik enerji sistemlərinin texniki, iqtisadi və ekoloji göstəricilərinə kompleks şəkildə müsbət təsir göstərir. Reaktiv gücün səmərəli kompensasiyası, transformatorların optimal idarə olunması və FACTS texnologiyalarının tətbiqi enerji itkilərini azaltmaqla yanaşı, elektrik avadanlıqlarının yüklənməsini optimallaşdırır və onların istismar müddətini artırır.

Bərpa olunan enerji mənbələrinin geniş tətbiqi şəraitində gərginlik rejimlərinin idarə olunması daha da aktuallaşır. Günəş və külək elektrik stansiyalarının dəyişkən istehsalı səbəbindən şəbəkədə gərginlik dalğalanmaları yaranır. Bu problemlərin həllində Smart Grid platformaları, PMU sistemləri, SCADA kompleksləri və süni intellekt əsaslı proqnozlaşdırma alqoritmləri mühüm rol oynayır.

Bundan əlavə, enerji itkilərinin azalması enerji istehsalı üçün tələb olunan yanacaq sərfini aşağı salır, nəticədə karbon emissiyaları azalır və enerji sisteminin ekoloji dayanıqlığı yüksəlir. Bu baxımdan gərginlik optimallaşdırılması enerji keçidinin və "yaşıl iqtisadiyyat" modelinin əsas texniki elementlərindən biri hesab edilə bilər.

12. Elmi Yenilik

Tədqiqatın elmi yeniliyi aşağıdakılardan ibarətdir:

- elektrik enerji sistemlərində gərginlik rejimlərinin optimallaşdırılması ilə enerji səmərəliliyi və dayanıqlı inkişaf göstəriciləri arasında qarşılıqlı əlaqə kompleks şəkildə təhlil edilmişdir;
- reaktiv güc kompensasiyası, FACTS texnologiyaları və Smart Grid həllərinin inteqrasiyalı tətbiqinin texniki-iqtisadi üstünlükləri müqayisəli şəkildə qiymətləndirilmişdir;
- enerji itkilərinin azaldılması və karbon emissiyalarının minimuma endirilməsi baxımından gərginlik idarəetməsinin rolu sistemləşdirilmişdir;
- adaptiv rəqəmsal idarəetmə yanaşmalarının gələcək enerji sistemlərində tətbiq perspektivləri əsaslandırılmışdır.

13. Praktiki Əhəmiyyət

Tədqiqatın nəticələri aşağıdakı istiqamətlərdə praktik əhəmiyyət kəsb edir:

- elektrik ötürücü və paylayıcı şəbəkələrin layihələndirilməsi və istismarı;
- enerji təchizatı müəssisələrində gərginlik rejimlərinin optimallaşdırılması;
- sənaye müəssisələrinin enerji idarəetmə sistemlərinin təkmilləşdirilməsi;
- enerji auditinin və enerji menecmentinin həyata keçirilməsi;
- Smart Grid layihələrinin hazırlanması;
- ali təhsil müəssisələrində magistr və doktorant səviyyəsində tədris prosesində istifadə;
- enerji sistemlərinin rəqəmsallaşdırılması üzrə elmi tədqiqatlarda tətbiq.

14. Nəticə

Aparılmış tədqiqat göstərir ki, elektrik enerji sistemlərində gərginlik rejimlərinin optimallaşdırılması enerji səmərəliliyinin yüksəldilməsi, elektrik enerjisinin keyfiyyətinin yaxşılaşdırılması və enerji təhlükəsizliyinin təmin edilməsi baxımından fundamental əhəmiyyətə malikdir. Transformatorların yük altında gərginlik tənzimlənməsi, reaktiv güc kompensasiyası, FACTS qurğuları və Smart Grid texnologiyalarının kompleks tətbiqi texniki itkilərin azalmasına, enerji resurslarından daha səmərəli istifadəyə və elektrik şəbəkələrinin etibarlılığının artırılmasına imkan verir.

Tədqiqat nəticələri göstərir ki, gərginlik rejimlərinin optimal idarə olunması yalnız texniki göstəricilərin yaxşılaşdırılması ilə məhdudlaşmır, həm də karbon emissiyalarının azaldılması, bərpa olunan enerji mənbələrinin şəbəkəyə təhlükəsiz inteqrasiyası və dayanıqlı enerji sistemlərinin formalaşdırılması baxımından mühüm əhəmiyyət daşıyır. Gələcək tədqiqatlarda optimal güc axını (OPF), rəqəmsal əkiz (Digital Twin), süni intellekt, dərin öyrənmə və gücləndirici öyrənmə alqoritmlərinin gərginlik rejimlərinin real vaxt rejimində proqnozlaşdırılması və adaptiv idarə edilməsində tətbiqinin araşdırılması məqsədəuyğun hesab olunur.

İstifadə edilmiş ədəbiyyat siyahısı

1. P. Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1994.
2. A. J. Wood, B. F. Wollenberg, G. B. Sheblé, *Power Generation, Operation, and Control*, 3rd ed. Wiley, 2014.
3. H. Saadat, *Power System Analysis*, 3rd ed. PSA Publishing, 2010.
4. IEC 60038:2016, *IEC Standard Voltages*.
5. EN 50160:2022, *Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Networks*.
6. IEEE Std 1159-2019, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*.
7. N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. IEEE Press, 2000.
8. B. Kroposki et al., "Achieving a 100% Renewable Grid," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 15, no. 2, pp. 61–73, 2017.
9. T. Gönen, *Electric Power Distribution Engineering*, 3rd ed. CRC Press, 2014.
10. A. Abur and A. G. Expósito, *Power System State Estimation: Theory and Implementation*. CRC Press, 2004.
11. United Nations, *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*, 2015.
12. International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook*, latest edition.

OPTIMIZATION OF VOLTAGE REGIMES IN ELECTRIC POWER SYSTEMS: ANALYSIS IN THE CONTEXT OF ENERGY EFFICIENCY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT

^{1,2}L.Ch.Suleymanova, ^{1,2}U.I.Ashurova

¹Doctor of Philosophy in Technics

²Mingachevir State University

Abstract: Electric energy is one of the key strategic resources ensuring the sustainable development of the modern economy and society. The reliable, safe, and cost-effective operation of electric power systems depends directly on the optimal management of voltage regimes within electrical grids. Voltage deviations beyond standard limits lead to increased active energy losses, a deterioration in electricity quality indicators, a reduction in the service life of electrical equipment, and a weakening of the power system's reliability. The article systematically analyzes the theoretical and methodological foundations for optimizing voltage regimes in electric power systems and evaluates the impact of voltage regulation on energy efficiency, power quality, and the stability of power systems. Within the scope of the research, the application potential of on-load tap-changing (OLTC) transformers, reactive power compensation devices, Flexible AC Transmission Systems (FACTS), and Smart Grid technologies was comparatively analyzed. At the same time, the role of digital control systems, SCADA platforms, and artificial intelligence-based control algorithms in reducing energy losses, ensuring voltage stability, and minimizing carbon emissions was evaluated.

Keywords: electric power systems, voltage regime, voltage optimization, energy efficiency, reactive power compensation, FACTS technologies, Smart Grid, sustainable development.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ: АНАЛИЗ В КОНТЕКСТЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

^{1,2}Л.Ч.СУЛЕЙМАНОВА, ^{1,2}У.И.АШУРОВА

¹доктор философии по технике

²Мингячевирский государственный университет

Резюме: Электроэнергия является одним из ключевых стратегических ресурсов, обеспечивающих устойчивое развитие современной экономики и общества. Надежная, безопасная и экономически эффективная эксплуатация электроэнергетических систем напрямую зависит от оптимального управления режимами напряжения в электрических сетях. Отклонения напряжения за пределы установленных норм приводят к росту потерь активной энергии, ухудшению показателей качества электроэнергии, сокращению срока службы электрооборудования и снижению надежности энергосистемы. В статье проводится систематический анализ теоретико-методологических основ оптимизации режимов напряжения в электроэнергетических системах, а также оценивается влияние регулирования напряжения на энергоэффективность, качество электроэнергии и устойчивость энергосистем. В рамках исследования был проведен сравнительный анализ возможностей применения трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН), устройств компенсации реактивной мощности, гибких систем передачи переменного тока (FACTS) и технологий интеллектуальных энергосетей (Smart Grid). В то же время была оценена роль цифровых систем управления, SCADA-платформ и алгоритмов управления на

базе искусственного интеллекта в снижении потерь энергии, обеспечении стабильности напряжения и минимизации выбросов углерода

Ключевые слова: *электроэнергетическая система, режим напряжения, оптимизация напряжения, энергоэффективность, компенсация реактивной мощности, технологии FACTS, Smart Grid, устойчивое развитие*