

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazma hüququnda

SİSTEM KÜLƏK ELEKTRİK QURĞULARININ İDARƏ EDİLMƏSİ ZAMANI ONLARIN ELEKTROMEXANİKİ ÇEVİRİCİLƏRİNDƏ GEDƏN KEÇİD PROSESLƏRİNİN MODELLƏŞDİRİLMƏSİ VƏ TƏDQIQ OLUNMASI

İxtisas: 3340.01 – Elektrotexniki sistemlər və komplekslər

Elm sahəsi: Texnika elmləri

İddiaçı: **Ləman Həsən qızı Həsənova**

Elmlər doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün
təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı – 2025

Dissertasiya işi Azərbaycan Elmi-Tədqiqat və
Layihə-Axtarış Energetika İnstitutunda yerinə yetirilmişdir

Elmi məsləhətçi:

Texnika elmləri doktoru, professor
Rauf İsmayıl oğlu Mustafayev

Rəsmi opponentlər:

Texnika elmləri doktoru, akademik
Arif Məmməd oğlu Həşimov

Texnika elmləri doktoru, professor
Ramiz Məhəmməd oğlu Alıquliyev

Texnika elmləri doktoru, dosent
Elçin Cəlal oğlu Qurbanov

Texnika elmləri doktoru, professor
Mərdan Fərəc oğlu Cəlilov

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya
Komissiyasının Azərbaycan Texniki Universitetinin nəzdində
fəalliyət göstərən ED 2.04 Dissertasiya şurası

Dissertasiya şurasının
sədri:

Texnika elmləri doktoru, professor



Nurəli Adil oğlu Yusifbəyli

Dissertasiya şurasının
elmi katibi:

Texnika elmləri namizədi, dosent



Vahid Qara oğlu Fərhadov

Elmi seminarın sədri:

Texnika elmləri doktoru, professor



Rasim Əzim oğlu Səidov

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. Enerji sistemində işləyən müasir külək elektrik qurğularının iş rejimlərinin analizi və tədqiqi üçün elmi metodların inkişafı demək olar ki, keçən əsrin 70-ci illərinin sonu və 80-ci illərinin əvvəllərində ilk sənaye külək qurğularının buraxılması və tətbiqi ilə başlamışdır. Kiçik güclü külək qurğularının işləmə prinsiplərinə dair ilk işlərin daha əvvəl 50-60-cı illərdə meydana çıxmasına baxmayaraq, sistemli tədqiqatlar yox idi.

Elektrik şəbəkəsində işləyən külək elektrik qurğularının iş rejimlərinin tədqiqinə çoxlu elmi əsərlər həsr olunmuşdur, həm də bu əsərlərin "coğrafiyası" genişdir – bu məsələlər üzərində Avropada (Danimarka, Almaniya, İspaniya, İngiltərə), Amerikada (əsasən ABŞ-da), Asiyada (Çin, Hindistan) intensiv şəkildə çalışırlar. Bu tədqiqatlar nəzərdən keçirilən məsələlərin geniş spektrinə həsr edilmişdir: sistem külək energetikası üçün uyğun bölgələrin külək enerji xarakteristikalarının tədqiqi¹; külək mühərriklərinin özlərinin xarakteristikalarının və işinin səmərəliliyinin tədqiqi²; sistem külək energetikasında istifadə olunan elektromexaniki çeviricilərin iş rejimlərinin tədqiqi³ və optimallaşdırılması və nəhayət, külək elektrik qurğularının enerji sisteminə paralel olaraq birgə işi məsələlərinin tədqiqi⁴.

¹ Региональные аспекты ветроэнергетики / Иванова, И. Ю., Карамов, Д. Н., Постников, И. В. [и др.]; отв. редакторы В. А. Стенников, В. Г. Курбацкий; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН. – Новосибирск: СО РАН, – 2020. – 296 с.

² Дзензерского, В.А., Пивняка, Г.Г. Ветроэнергетика. Информационно-аналитический обзор по альтернативной энергетике: монография /С.В. Тарасов, Ф.П. Шкрабец, В.А. Задонцев, С.В. Отчич; под общ. ред. В.А. Дзензерского и Г.Г. Пивняка; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Д.: НГУ, – 2014.

³ Bellarbi, S. Electromechanical study the wind energy conversion system based DFIG and SCIG generators // International journal of mechanics. – 2021; Vol. 15, – p. 102-106.

⁴ Qazi, S. H., Mustafa, M. W. B. Technical issues on integration of wind farms with power grid-A review // International Journal of Renewable and Sustainable Energy. – 2014. Vol.3, No. 5, – p. 87-91.

Yuxarıda göstərilən istiqamətlərin hər biri elektrik şəbəkəsində işləyən böyük güclü sənaye sistem külək elektrik qurğularının inkişafı və istismarı ilə bağlı qlobal məsələlərin ümumi problematikasında ayrı müstəqil problemdir.

Bu dissertasiya işində tədqiqat işlərinin dairəsi yalnız külək elektrik qurğularının elektromexaniki çeviriciləri ilə (yəni elektrik maşınları) məhdudlaşdırılmışdır. Fikrimizcə, külək elektrik qurğularının bu həlqəsi ən vacib və mürəkkəbdir, lakin ən əsası odur ki, bütün külək elektrik qurğularının dayanıqlığını və səmərəliliyini artırmağa imkan verən ən asanlıqla idarə oluna bilən (optimal qanunlar üzrə idarəetmə də daxil olmaqla) külək elektrik qurğularının həlqəsidir.

Dissertasiya işində elektrik şəbəkəsinə işləyən meqavat sinifinə aid iri külək elektrik qurğuları nəzərə alındığından, təbii olaraq, külək elektrik qurğularının özlərinin fəaliyyətinin müvafiq avtomatlaşdırma və idarəetmə sistemləri tərəfindən təmin olunan iqtisadi və texnoloji səmərəliliyinə nail olanda, şəbəkə və istehlakçılar ilk növbədə istehsal olunan elektrik enerjisinin keyfiyyətinə artan tələblər irəli sürürlər.

Çoxsaylı texniki ədəbiyyat mənbələrinin işlənməsi və analizi⁵ göstərir ki, bu gün meqavat sinifinə aid sistem külək energetikasında "klassik" sinxron və qısa qapanmış rotorlu asinxron generatorlardan (bu maşınların stator dövrələrində tezlik çeviriciləri var) ibarət olan külək enerjisinin elektrik enerjisinə elektromexaniki çevrilmə sistemləri geniş yayılmışdır və uğurla tətbiq olunmağa davam edir. Bununla belə, külək energetikasında istifadə olunan tezlik çeviriciləri tam idarə olunan GTO – tiristorlar və ya IGBT güc tranzistorları əsasında hazırlanır.

Yuxarıda göstərilən generatorlardan başqa, rotor tərəfində tezlik çeviriciləri ilə idarə olunan iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınlar əsasında hazırlanmış generatorlar və həmçinin, sabit maqnitli tezliyə görə idarə olunan sinxron generatorlar külək energetikasında geniş yayılmışdır.

⁵ Касьянов, С. Е., Москаленко, В. В., Рывлин, И. А. и др. Принципы моделирования ветроэнергетических установок для расчета токов короткого замыкания // Известия НТЦ единой энергетической системы. – 2017. № (1) 76, – с.21-26.

Geyd olunan elektrik enerjisi generasiya sxemlərinin istifadəsi külək mühərrikinin növü və gücü, külək turbininin quraşdırıldığı bölgənin külək xarakteristikaları, elektrik şəbəkələrinin onların qoşulma yerlərində irəli sürdüyü şərtlər, yükün xarakteri və s. ilə müəyyən edilir.

Külək energetikasında istifadə olunan bütün elektromexaniki çeviricilər üçün bir vəziyyət dəyişməkdir – onlardakı enerji daşıyıcısı külək axınıdır və onun sürəti külək elektrik qurğuları tərəfindən enerji sisteminə verilən gücü müəyyənləşdirir.

Külək sürəti dəyişkən kəmiyyətdir, onun dəyişmə diapazonu əhəmiyyətli qiymətlərə çata bilər, hətta küləyin sürət çalxalanmalarının (yəni təcillərin) dəyişmə sürəti də əhəmiyyətli qiymətlərə çata bilər.

Bütün bunlar müasir külək elektrik qurğularında istifadə olunan tezliyə görə idarə olunan elektromexaniki çeviricilərin dinamik iş rejimlərini təyin etmək və idarə etmək bacarığını tələb edir.

Qeyd olunduğu kimi, dinamik rejimləri öyrənməklə və külək elektrik qurğularında tezliyə görə idarə olunan generatorların işinin sabitliyini təmin etməklə yanaşı, kvazistasionar iş rejimlərində külək elektrik qurğularının işinin səmərəliliyinin artırılması, şəbəkəyə verilən elektrik enerjisinin keyfiyyətinin təmin edilmə məsələsi mühüm əhəmiyyətə malikdir.

Əlbəttə, yuxarıda göstərilən məsələlərin bu və ya başqa dərəcədə həll olunduğu bir çox texniki ədəbiyyat mənbəyi var. Lakin, ədəbiyyatın analizi göstərir ki, bu gün elektromexaniki çeviriciləri tezlik çeviriciləri ilə təchiz olunmuş meqavat sinfinə aid sistem külək elektrik qurğularının dinamik və statik iş rejimlərinin modelləşdirilməsi və tədqiqi üçün universal və nisbətən sadə metodlar yoxdur, bu külək elektrik qurğularının iş rejimlərinin idarəetmə və optimallaşdırma məsələləri tam aydınlaşdırılmayıb.

Yuxarıda deyilənlərin hamısı birmənalı şəkildə dissertasiya işinin mövzusunun aktuallığı barədə nəticə çıxarmağa imkan verir.

Tədqiqatın obyekti və predmeti. Tədqiqat obyekti külək elektrik qurğularında istifadə olunan dəyişən cərəyanlı elektrik maşınlarıdır. Tədqiqatın predmeti dəyişən cərəyanla işləyən elektrik maşınlarının

riyazi modelinin universal strukturunun işlənilib hazırlanması və bu modellər üzrində maşınların müxtəlif iş rejimlərinin öyrənilməsidir.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri. Bu dissertasiya işinin məqsədi sistem külək energetikasında istifadə olunan müxtəlif tipli tezliyə görə idarə olunan sinxron və asinxron generatorların universal, nisbətən asan tətbiq olunan riyazi modelləşdirmə metodlarının işlənilib hazırlanması, işlənmiş modellər üzərində külək elektrik qurğularının idarəetmə və optimallaşdırma ilə birlikdə dinamik və kvaziqərarlaşmış iş rejimlərinin tədqiqatıdır.

Bu məqsədə nail olunması ilə külək enerjisinin elektrik enerjisinə davamlı və keyfiyyətli çevrilməsi əhəmiyyətli dərəcədə artırılacaqdır.

Öz növbəsində, bu məqsədə xülasə edilmiş mövzunun aşağıdakı məsələlərini həll etməklə nail olmaq mümkündür:

- külək elektrik qurğularında istifadə olunan demək olar ki, bütün növ elektrik maşınlarının rotorunun sürətində fırlanan oxlarda yazılan tənliklərə əsaslanan riyazi modelinin universal strukturunun işlənilib hazırlanması. Modelin strukturu dəyişən cərəyan maşınlarının bütün mümkün idarəetmə növlərini nəzərə almağa imkan verir: həm stator tərəfindən, həm də rotor tərəfindən tezliyə görə tənzimlənməni;

- tezliyə görə idarə olunan həm qısa qapanmış rotorlu, həm də faza rotorlu (iki tərəfdən qidalanan asinxron maşın) külək elektrik qurğularının üç fazalı asinxron maşınlarının üç koordinatlı riyazi modelinin işlənilib hazırlanması;

- sabit maqnitli və elektromaqnit təsirlənməsi olan külək elektrik qurğularında tezliyə görə idarə olunan sinxron generatorun riyazi modelinin işlənilib hazırlanması;

- işlənilib hazırlanmış riyazi modellər üzərində külək elektrik qurğularının bütün növ tezliyə görə idarə olunan generatorlarının dinamik və kvazistatik iş rejimlərinin tədqiqi, bu rejimlərin idarə edilməsi və optimallaşdırılması üzrə tövsiyələrin verilməsi.

Bu məsələlərin və onların həllinin yekunu dissertasiya işində qarşıya qoyulmuş məqsədə nail olmaq üçün kifayətdir və bu, iri külək elektrik qurğularının layihələndirməsinin keyfiyyətini və onların işləmə səmərəliliyini artıracaqdır.

Tədqiqat metodları. Bu işdə istifadə olunan elektrik maşınlarının tədqiqi metodları üç elektromexaniki qanuna əsaslanır:

- enerjinin elektromexaniki çevrilməsi 100%-ə bərabər faydalı iş əmsalı ilə mümkün ola bilməz, yəni $\eta < 100\%$;
- bütün elektrik maşınları dönmə qabiliyyətinə malikdirlər, yəni eyni elektrik maşını həm generator, həm də mühərrik kimi işləyə bilər;
- enerjinin elektromexaniki çevrilməsi bir-birinə nisbətən hərəkətsiz olan elektromaqnit sahələri tərəfindən həyata keçirilir. Yəni, maşındakı yekunlaşdırıcı sahə stator və rotor sahələri tərəfindən yaradılır, eyni zamanda qərarlaşmış rejimdə bu sahələr bir-birinə nisbətən hərəkətsiz olur.

Dissertasiya işində əsas tədqiqat metodu sistemli külək energetikasında istifadə olunan dəyişən cərəyan elektrik maşınlarının riyazi modelləşdirmə metodudur. Elektromexaniki çeviricilərin modelləşdirilməsi üçün təklif olunan metodların orijinallığı ondan ibarətdir ki, ilk növbədə universal, yəni bir strukturda maşınların müxtəlif növ və tiplərini öyrənməyə imkan verirlər, ikincisi, bu maşınların bütün idarəetmə üsullarını nisbətən sadə təsvir etməyə imkan verirlər, təbii ki, dəyişən cərəyan maşınları üçün əsas idarəetmə metodu həm sinxron, həm də asinxron maşınlar üçün tezliyə görə idarəetmədir, habelə sinxron maşınlar üçün təsirlənmə idarəetməsi və asinxron maşınlar üçün gərginlik amplitudasının idarəetməsidir.

Bu əsas metoddan başqa, Pontryagin optimal idarəetmə metodu, Furse sıraları vasitəsilə çevrilmə metodları, həmçinin avtomatik idarəetmə və tənzimləmə nəzəriyyəsi metodları xüsusi məsələlərin həlli üçün bu işdə əlavə tətbiq tapmışdır.

Beləliklə, qoyulmuş məsələlərin həlli və dissertasiyanın məqsədinə nail olmaq üçün aşağıdakı riyazi aparat tətbiq olunmuşdur:

- xətti və qeyri-xətti diferensial tənliklər nəzəriyyəsi;
- avtomatik tənzimləmə və idarəetmə nəzəriyyəsi;
- optimal idarəetmə nəzəriyyəsinin elementləri.

Bununla belə, qeyd etmək lazımdır ki, tədqiqat üçün işlənib hazırlanmış və tətbiq olunmuş bütün modelləşdirmə metodlarının yuxarıda göstərilən üç elektromexaniki qanunu tam ödəməlidir.

Müəfiyyə çıxarılan əsas müddəalar:

1. Modelləşdirmə və tədqiqat prosedurunun əhəmiyyətli dərəcədə sadələşdirməyə və külək elektrik qurğularında müxtəlif növ generatorların tədqiqat nəticələrini asanlıqla müqayisə etməyə və qiymətləndirməyə imkan verən külək energetikasında istifadə olunan tezliyə görə idarə olunan bütün elektrik maşınlarının riyazi modelinin unifikasiya edilmiş strukturu.

2. Qeyri-simmetrik və qeyri-tamfazalı iş rejimlərinin tədqiqi üçün, xüsusilə vacib olan tezliyə görə idarə olunan iki tərəfdən qidalanan asinxron maşının üç oxlu modeli.

3. Külək elektrik qurğularında sabit maqnitli sinxron generatorun riyazi modeli, onun mahiyyəti generatorun tənliklərində sabit maqnitin təsirini nəzərə almaqla yanaşı, generatorun stator gərginliyinin amplitudunun və tezliyinin tənzimlənməsi üsuludur.

4. Sabit maqnitli sinxron generatorları olan külək elektrik qurğularının statik və dinamik xüsusiyyətlərinin tədqiqi, bu generatorların rotorlarının rəqslərinin dayanıqlığı və dempferlənməsinin artırılması üsulları.

5. "Külək – külək turbini – elektromexaniki çevirici – elektrik şəbəkəsi" sisteminin imitasiya modeli.

6. Külək elektrik qurğularında tənzimlənən elektrik maşınlarının rejim parametrlərinə gərginliyin yüksək harmonikalarının təsirinin nəzərə alınması üsulu.

7. Skalyar idarəetmə zamanı asinxron maşınların səmərəliliyinin analizi.

8. Külək elektrik qurğularında asinxron generatorların tezliyə görə işəsalma rejimlərinin müqayisəli analizi.

9. Texnoloji zərurət yarandıqda iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınların sinxron generator rejiminə keçirilmə üsulu və onun riyazi modeli.

10. Külək elektrik qurğularının külək mühərriklərinin pərlərinin dönmə bucağının modelləşdirilməsi metodu.

11. Müxtəlif konstruksiyalı asinxron generatorları üçün reaktiv gücün kompensasiya üsulları.

12. Xarici şəbəkə parametrlərinin və lokal yükün iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınli külək elektrik qurğularının iş rejiminə təsirinin nəzərə alınması.

13. Məhdud güc mənbəyinə paralel işləyərkən iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınli külək elektrik qurğularının iş rejimlərinin modelləşdirilməsi və tədqiqi.

Tədqiqatın elmi yeniliyi külək energetikasındakı elmi istiqamətin sonrakı inkişafıdır, buraya elektrik şəbəkəsində işləyən külək elektrik qurğularının bütün növ elektromexaniki çeviricilərinə keçid və kvazistasionar proseslərin optimallaşdırılması elementləri də daxil olmaqla modelləşdirmə, tədqiqat metodologiyasının yeni müddəalarının işlənilib hazırlanması daxildir.

Elmi yeniliyə aşağıdakılar daxildir:

- külək elektrik qurğularında tezliyə görə idarə olunan dəyişən cərəyan elektrik maşınlarının riyazi modelinin unifikasiya edilmiş strukturunun işlənilib hazırlanması;

- stator tərəfindən tezlik çeviricisi vasitəsilə idarə olunan külək elektrik qurğularının sabit maqnitli sinxron generatorunun modelləşdirilmə metodunun işlənilib hazırlanması;

- külək elektrik qurğularında asinxron maşınların üç koordinatlı riyazi modelinin işlənilib hazırlanması;

- həm külək elektrik qurğularının sabit maqnitli asinxron maşınları üçün, həm də tezliyə görə idarəetmə zamanı elektromaqnit təsirlənmə ilə kvazistasionar rejimlərdə müxtəlif tənzimləmə qanunlarının tədqiqi və analizi;

- sabit maqnitli tezliyə görə idarə olunan sinxron generatorlarla təchiz olunmuş külək elektrik qurğularının dinamik rejimlərinin modelləşdirilməsi və tədqiqi;

- Pontryagin optimal idarəetmə nəzəriyyəsinin elementlərindən istifadə edərək, sabit maqnitli tezliyə görə idarə olunan sinxron maşınların rotorlarının rəqslərinin dempferləşdirilməsi;

- tezlik çeviricisinin gərginliyinin yüksək harmonikalarının sabit maqnitli sinxron generatorun iş parametrlərinə və külək elektrik

qurğularının iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınların parametrlərinə təsirinin modelləşdirilməsi və tədqiqi;

- şəbəkə gərginliyinin dəyişməsinin iki tərəfdən qidalanan maşını ilə külək elektrik qurğularının iş rejiminə təsiri və sistemin dinamik sabitliyini artırma yolları;

- riyazi modelin tam və sadələşdirilmiş tənliliklərinə görə iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınları ilə külək elektrik qurğularının iş rejimlərinin hesablanması nəticələrinin qiymətləndirilməsi;

- skalyar idarəetmədə qısa qapanmış rotorlu tezliyə görə idarə olunan asinxron maşınların işinin səmərəliliyinin və maşının özündə minimum güc itkisinin təmin edilməsinin, həmçinin ifratyüklənmə qabiliyyəti və maqnit selinin qiymətlərinin sabitliyinin analizi.

- qısa qapanmış rotorlu asinxron generatorlu külək elektrik qurğularının və iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınları olan külək elektrik qurğularının tezliyə görə işəsalma rejimlərinin müqayisəli analizi;

- sinxron iş rejimində külək elektrik qurğularında iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınların istifadəsi üzrə texniki həll, onun modelləşdirilməsi və tədqiqi;

- külək elektrik qurğularının pərlərinin dönmə bucağının tənzimlənməsinin modelləşdirilməsi metodu;

- qısa qapanmış rotorlu asinxron generatorlar və iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınlar üçün reaktiv gücün kompensasiyası üsullarını;

- xarici şəbəkə parametrlərinin və lokal yükün sonsuz güc şəbəkəsində işləyən iki tərəfdən qidalanan maşın ilə külək elektrik qurğularının iş rejimlərinə təsirinin modelləşdirilməsi və tədqiqi;

- məhdud güc mənbəyinə paralel işləyərkən iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınları olan külək elektrik qurğularının iş rejimlərinin tədqiqi;

- müxtəlif elektromexaniki çeviriciləri olan külək elektrik qurğularının iş rejimlərinin imitasiya modelləşdirilməsi.

Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti. Təklif olunan modelləşdirmə metodları, hesablama alqoritmləri, habelə müxtəlif

modellərdə əldə edilmiş çoxsaylı fluktoqramlar mühəndislərin istifadəsini sadələşdirməklə onlarca külək elektrik qurğularından ibarət külək stansiyasının layihələndirmə mərhələsində, həm də istismar mərhələsində istifadə edilə bilər.

Alınan tədqiqat nəticələri və texniki həllər müxtəlif elektromexaniki çeviriciləri olan külək elektrik qurğularının fəaliyyətinin sabitliyi və səmərəliliyinin (iqtisadi baxımdan da daxil olmaqla) əhəmiyyətli dərəcədə artırılmasına imkan verirlər, o cümlədən Azərbaycanın külək şəraitində.

Bir neçə il ərzində praktiki tövsiyələr şəklində nəticələr sisteməlik olaraq "Azərenerji" ASC-nin müvafiq xidmətlərinə çatdırılmışdır (təqdim edilmişdir). Təvsiyələrin bir hissəsi də Alternativ və bərpa olunan enerji mənbələri üzrə Dövlət Agentliyinə praktiki istifadə üçün təqdim edilmişdir.

Aprobasiyası və tətbiqi. Dissertasiya işinin əsas nəticələri və elmi müddəaları beynəlxalq konfranslarda məruzə edilmişdir:

- “Rusiya ilə Şərqi Asiya arasında energetika əlaqələri: XXI əsrdə inkişaf strategiyası. Birgə simpozium. İrkutsk, Rusiya: 30 Avqust – 10 Sentyabr 2010-cu il;

- “Elektrotexnikanın texniki və fiziki problemləri” mövzusunda 6-cı Beynəlxalq Konfrans, ICTPE–2010, Təbriz, İran: 14–16 sentyabr 2010-cu il;

- “Sənayedə Nəzarət və Optimallaşdırma” üzrə 3-cü Beynəlxalq Konfrans, COIA 2011, Ankara, Türkiyə: 22–24 avqust 2011-ci il;

- “Elektrotexnikanın texniki və fiziki problemləri” mövzusunda 8-ci Beynəlxalq Konfrans, Ostfold Universiteti Kolleci, ICTPE–2012, Fredrikstad, Norveç: 5–7 sentyabr 2012-ci il;

- “İri həcmli enerji sistemlərin etibarlılığının öyrənilməsinin metodoloji məsələləri” Yu.N.Rudenko adına Beynəlxalq elmi seminar. Bazar şəraitində enerji sistemlərinin etibarlılığı problemləri. Bakı, Azərbaycan: 17–21 sentyabr 2012-ci il;

- “İri həcmli enerji sistemlərin etibarlılığının tədqiqatının metodoloji məsələləri” Yu.N.Rudenko adına Beynəlxalq elmi seminar. “Liberalizasiya edilmiş Energetika Sistemlərinin Etibarlılığı” Sankt-Peterburq, Rusiya: 30 iyun – 4 iyul 2014-cü il;

- “Müasir Elektroenergetik Sistemlər” adlı Beynəlxalq Konfransı. MEPS–15. Wrocław, Polşa: 6–9 iyul 2015-ci il;
- Elektrotexnikanın texniki və fiziki problemləri“ mövzusunda 12-ci Beynəlxalq Konfrans, Bilbao, İspaniya: ICTE-2016, 7–9 sentyabr 2016-cı il;
- IFAC-ın Texnologiya, Mədəniyyət və Beynəlxalq Sabitlik üzrə 18-ci Konfransı. TECIS 2018, Bakı, Azərbaycan: 13–15 sentyabr 2018-ci il;
- “Gələcəyin Enerjisi: Çağırışlar və İmkanlar” 1-ci Beynəlxalq Konfransı (ICEFCO–2018), Bakı, Azərbaycan: 10–13 sentyabr 2018-ci il;
- “Elektrotexnikanın texniki və fiziki problemləri“ mövzusunda 14-ci Beynəlxalq Konfrans. Naxçıvan Dövlət Universiteti, (ICTPE-2018), Naxçıvan, Azərbaycan: 15–17 oktyabr 2018-ci il
- “Elektrik Mühəndisliyinin Texniki və Fiziki Problemləri” mövzusunda 15-ci Beynəlxalq Konfrans (ICTPE-2019), İstanbul, Türkiyə: 13–15 oktyabr 2019-cu il.

Bundan başqa, nəticələr Azərbaycan Elmi-Tədqiqat və Layihə-Axtarış Energetika İnstitutunun seminarlarında və "Azərenerji" ASC-nin müvafiq xidmətlərində məruzə edilmişdir.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı. Dissertasiya işi Azərbaycan Elmi-Tədqiqat və Layihə-Axtarış Energetika İnstitutunda yerinə yetirilmişdi.

Tədqiqatın dərc olunma dərəcəsi. Dissertasiyanın əsas nəticələri 60 elmi nəşrdə, o cümlədən 46 elmi məqalədə, 12 beynəlxalq elmi konfransların materialları və tezislərində, həmçinin 1 monoqrafiyada və 1 patentdə təqdim edilmişdir. Nəşrlərin ümumi sayından 34-ü xaricdə çap olunub. Beynəlxalq məlumat bazalarında indeksləşdirilmiş dövrü nəşrlərdə on iki məqalə dərc olunur: Web of Science (3 məqalə) və Scopus (9 məqalə). Altı elmi məqalə müəllif tərəfindən müstəqil, həmmüəllifsiz yazılıb.

Dissertasiyanın struktur bölmələrinin ayrılıqda həcmi qeyd olunmaqla dissertasiyanın işarə ilə ümumi həcmi. Dissertasiyanın məzmunu 354 səhifədə 14 cədvəl, 70 şəkil və 267 adda nömrələnmiş texniki ədəbiyyat siyahısı 22-si internet resursları olmaq ilə təqdim

edilmişdir. Dissertasiyanın ümumi həcmi (boşluqlar, cədvəllər, qrafiklər və istinadlar istisna olmaqla) 343808 işarə təşkil etmişdir: Giriş – 26 səhifə (41296 işarə), dörd fəsil (Fəsil I – 51 səhifə (51980 işarə); Fəsil II – 72 səhifə, (78880 işarə); Fəsil III– 109 səhifə, (111604 işarə); Fəsil IV – 44 səhifə (37987 işarə), Nəticələr – 11 səhifə (18257 işarə).

İŞİN MƏZMUNU

Girişdə bütün dünyadakı külək energetika güclərinin artım dinamikası analiz edilir^{6,7} və Azərbaycanda külək energetikasının vəziyyəti və inkişaf yolları qiymətləndirilir^{8,9}.

Tədqiq ediləcək məsələlərin əsaslandırılması və formalaşdırılması həyata keçirilir. Dissertasiya işinin mövzusunun aktuallığı müəyyənləşdirilir, tədqiqatın məqsədləri formalaşdırılır, əsaslandırılmış tədqiqat metodları verilir.

Dissertasiyada həll olunmuş məsələlərin elmi yeniliyi, müdafiyyə çıxarılan əsas müddəaları, işin praktiki dəyəri, həmçinin işin aprobeasiyası, nəşrlərin siyahısı və dissertasiyanın strukturu səciyyələndirilir.

Birinci fəsildə elektrik şəbəkəsində işləyən meqavat sinifinə aid müasir külək elektrik qurğularında¹⁰ istifadə olunan elektromexaniki çeviricilərin növləri¹¹ və tiplərinin analizi məsələləri izah edilir. Qeyd edilir ki, külək elektrik qurğularının elektrik maşınlarının keçid və

⁶ Renewable Energy Statistics 2022: [Electronic resource] / International Renewable Energy Agency (IRENA). – July 18, 2022. URL: <https://www.irena.org/Statistics>

⁷ IEA Wind TCP Annual Report – 2020, p. 56.

⁸ Насибов В.Х. Развитие ВИЭ и энергоэффективности в Азербайджане за последние годы: [Elektron resurs] / UNECE – October 11, 2021. URL: <https://unece.org/sites/default/files/2021-11/10-Valeh-Nasibov-Azerbaijan.pdf>

⁹ Отчет GWEC: [Elektron resurs] / – 2021. URL: <https://www.gwec.net/>

¹⁰ Котов, А. А. Применение генератора двойного питания для ветроэнергетических установок малой, средней и большой мощности / А. А. Котов, Н. И. Неустроев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017; – Т. 17, № 4. – с. 80-89.

¹¹ Yaramasu, V. High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies / V. Yaramasu, B. Wu, P.C. Sen [et al.] // Proc. IEEE – 2015.103, – p. 740-788.

kvaziqərarlaşmış iş rejimlərinin tədqiqi üçün ən effektiv və perspektivli üsul riyazi modelləşdirmə üsuludur^{12,13}.

Bununla əlaqədar olaraq, külək elektrik qurğularının tezliyə görə idarə olunan elektrik maşınlarının universal riyazi modelinin yeni strukturu hazırlanmışdır. Universal riyazi model tənliklərin bir strukturunda külək energetikasında istifadə olunan bütün növ elektrik maşınlarını təsvir etməyə və tədqiq etməyə imkan verir. Aşağıda külək elektrik qurğularının tezliyə görə idarə olunan elektrik maşınlarının universal riyazi modelinin strukturu göstərilmişdir.

Tezliyə görə idarə olunan dəyişən cərəyan elektrik maşınlarının riyazi modelinin əsası kimi ω_r rotor sürəti ilə fırlanan oxlarda yazılan məlum Park-Qorev tənlikləri¹⁴ götürülür, həm də nəzərə almaq lazımdır ki, maşın iki stator və dörd rotor dolağı ilə təchiz edilmişdir. Park-Qorev tənliklərindən fərqli olaraq, təqdim olunan tənliklərdə əsas parametrlər kimi ω_r rotor sürətində fırlanan rotor oxu ilə ω_s sinxron sürətdə fırlanan sinxron ox arasındakı güc bucağı θ deyil, α bucağı kimi işarə edilən rotor oxu və hərəkətsiz ox arasındakı bucaq götürülür. Beləliklə, rotorun sürəti $\omega_r = p\alpha = \frac{d\alpha}{dt}$, burada p – differensiallaşma işarəsi, τ – sinxron vaxtı $\tau = \omega_s \cdot t = 314 \cdot t$, t – saniyədə olan vaxtdır.

Belə halda, idarə olunan dəyişən cərəyan elektrik maşınlarının tənlikləri dama-matrisa şəklində yazıla bilər:

$$\begin{bmatrix} p\Psi_s \\ p\Psi_f \\ p\Psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{s1} & A_{s2} & A_{s3} \\ B_{f1} & B_{f2} & B_{f3} \\ C_{r1} & C_{r2} & C_{r3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_f \\ \Psi_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_s \\ U_f \\ U_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

¹² Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин: учебник для ВУЗов / под ред. И.П.Копылова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, – 2001. – 327 с.

¹³ Соколова, Н.И. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах / Н.И.Соколова, И.А.Груздев, К.П.Кадомская, [и др.] – Москва-Ленинград: Энергия, – 1964. – 408 с.

¹⁴ Воропай, Н.И. Электромеханические переходные процессы: учеб. пособие / Н.И. Воропай. – Благовещенск: АмГУ, – 2013. – с. 151.

Sütun matrisləri stator, təsirləndirmə və rotor dolaqlarının ilişmə sellərinin törəmələrinin d, q oxları üzrə proyeksiyalarını əks etdirən vektorlardır:

$$p\Psi_s = \begin{bmatrix} p\Psi_{ds} \\ p\Psi_{qs} \end{bmatrix}; p\Psi_f = \begin{bmatrix} p\Psi_{df} \\ p\Psi_{qf} \end{bmatrix}; p\Psi_r = \begin{bmatrix} p\Psi_{dr} \\ p\Psi_{qr} \end{bmatrix}; \Psi_s = \begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \end{bmatrix};$$

$$\Psi_f = \begin{bmatrix} \Psi_{df} \\ \Psi_{qf} \end{bmatrix}; \Psi_r = \begin{bmatrix} \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} \text{ и } U_s = \begin{bmatrix} U_{ds} \\ U_{qs} \end{bmatrix}; U_f = \begin{bmatrix} U_{df} \\ U_{qf} \end{bmatrix}; U_r = \begin{bmatrix} U_{dr} \\ U_{qr} \end{bmatrix}.$$

Qalan matrislər:

$$\left. \begin{aligned} A_{s1} &= \begin{bmatrix} -r_s \cdot k_{ds} & -\omega_r \\ \omega_r & -r_s \cdot k_{qs} \end{bmatrix}; & A_{s2} &= \begin{bmatrix} -r_s \cdot k_{dsf} & 0 \\ 0 & -r_s \cdot k_{qsf} \end{bmatrix}; \\ A_{s3} &= \begin{bmatrix} -r_s \cdot k_{dsr} & 0 \\ 0 & -r_s \cdot k_{qsr} \end{bmatrix}; & B_{f1} &= \begin{bmatrix} -r_{df} \cdot k_{dsf} & 0 \\ 0 & -r_{qf} \cdot k_{qsf} \end{bmatrix}; \\ B_{f2} &= \begin{bmatrix} -r_{df} \cdot k_{df} & 0 \\ 0 & -r_{qf} \cdot k_{qf} \end{bmatrix}; & B_{f3} &= \begin{bmatrix} -r_{df} \cdot k_{dfr} & 0 \\ 0 & -r_{qf} \cdot k_{qfr} \end{bmatrix}; \\ C_{r1} &= \begin{bmatrix} -r_{dr} \cdot k_{dsr} & 0 \\ 0 & -r_{qr} \cdot k_{qsr} \end{bmatrix}; & C_{r2} &= \begin{bmatrix} -r_{dr} \cdot k_{dfr} & 0 \\ 0 & -r_{qr} \cdot k_{qfr} \end{bmatrix}; \\ C_{r3} &= \begin{bmatrix} -r_{dr} \cdot k_{dr} & 0 \\ 0 & -r_{qr} \cdot k_{qr} \end{bmatrix}. \end{aligned} \right\}$$

burada $r_s, r_{df}, r_{qf}, r_{dr}, r_{qr}$ – müvafiq olaraq, d, q oxlar üzrə stator, təsirləndirmə və rotor dolaqlarının aktiv müqavimətləri; $k_{ds}, k_{dsf}, k_{qs}, k_{qsf}, k_{qsr}, k_{df}, k_{dfr}, k_{qf}, k_{qfr}, k_{dr}$ və k_{qr} əmsalları i_{df}, i_{qf} təsirləndirmə dolaqlarının və i_{dr}, i_{qr} rotor dolaqlarının i_{ds}, i_{qs} stator dolaqlarının cərəyanlarının qiymətlərini müvafiq ilişmə selləri ilə əlaqələndirirlər. Aşağıdakı matrislərin bərabərliyindən asanlıqla müəyyən edilir:

$$\begin{bmatrix} k_{ds} & 0 & k_{dsf} & 0 & k_{dsr} & 0 \\ 0 & k_{qs} & 0 & k_{qsf} & 0 & k_{qsr} \\ k_{dsf} & 0 & k_{df} & 0 & k_{dfr} & 0 \\ 0 & k_{qsf} & 0 & k_{qf} & 0 & k_{qfr} \\ k_{dsr} & 0 & k_{dfr} & 0 & k_{dr} & 0 \\ 0 & k_{qsr} & 0 & k_{qfr} & 0 & k_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ds} & 0 & x_{ad} & 0 & x_{ad} & 0 \\ 0 & x_{qs} & 0 & x_{aq} & 0 & x_{aq} \\ x_{ad} & 0 & x_{df} & 0 & x_{ad} & 0 \\ 0 & x_{aq} & 0 & x_{qf} & 0 & x_{aq} \\ x_{ad} & 0 & x_{ad} & 0 & x_{dr} & 0 \\ 0 & x_{aq} & 0 & x_{aq} & 0 & x_{qr} \end{bmatrix}^{-1} \quad (2)$$

burada $\chi_{ds}, \chi_{qs}, \chi_{df}, \chi_{qf}, \chi_{dr}, \chi_{qr}$ – dəyişən cərəyan maşınlarının, müvafiq olaraq stator dolaqlarının, təsirləndirmə dolaqlarının və rotor dövrələrinin d, q oxları üzrə tam induktiv müqavimətləri; $\chi_{ad}, \chi_{aq} - d, q$ oxları üzrə qarşılıqlı induksiyanın müqavimətləridir. (1) və (2) tənliklərindən başqa, m_T hərəkətverici (tormozlama) momenti və m_{em} elektromaqnit momenti olan elektrik maşınının hərəkət tənliklərini də nəzərə almaq lazımdır:

$$\left. \begin{aligned} T_j \cdot p\omega_r &= m_T - m_{em} \\ m_{em} &= (k_{qs} - k_{ds}) \cdot \Psi_{ds} \cdot \Psi_{qs} + k_{qsf} \cdot \Psi_{ds} \cdot \Psi_{qf} + k_{qsr} \cdot \Psi_{ds} \cdot \Psi_{qr} - k_{dsf} \cdot \Psi_{qs} \cdot \Psi_{df} - k_{dsr} \cdot \Psi_{qs} \cdot \Psi_{dr} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

burada T_j – “elektrik maşını – ötürücü (tormozlama) mexanizmi” sisteminin hərəkətverici hissələrinin ətalət sabiti, [radian].

Tənliklərin belə yazılmasında, dəyişən cərəyan maşın modelinin universal strukturundakı idarəetmə parametrləri kimi aşağıdakılardan istifadə edilə bilər: U_{ds} və U_{qs} –amplitudu və tezliyi tənzimlənə bilən stator dolağının gərginliyinin təşkilediciləri; U_{df} və $U_{qf} - d, q$ uzununa və eninə oxlar üzrə təsirləndirmə dolaqlarına verilən sabit gərginliyin qiymətləri; U_{dr}, U_{qr} –amplituda və tezliyə görə də tənzimlənə bilən maşının rotor dolağını qidalandırılan gərginliyin təşkilediciləridir.

Dəyişən cərəyan maşınlarının universal riyazi modelinin strukturu maşının rotorunun ω_r sürətində fırlanan d, q oxlarında tənliklərin yazılma formasına əsaslandığına görə, U_{df} və U_{qf} gərginliklərini modelləşdirmək çətin deyil, çünki onlar təsirləndirmə tənzimləyicilərinin çıxışından verilir, elektrik maşınlarının rotor dolağını qidalandırılan tezlik çeviricisinin çıxışından alındıqları şəkildə modelləşdirildiyinə görə rotor dolağının gərginliyinin U_{dr} və U_{qr} təşkilediciləri də asanlıqla modelləşdirilir.

Stator dolağı üçün stator gərginliyinin U_{ds} və U_{qs} təşkiledicilərinin maşınların stator dolağını qidalandıran gərginliyin amplitudunun və tezliyinin dəyişməsinə (tənzimlənməsinə) əks etdirən şəkildə təqdim edilməsi lazımdır.

Dəyişən cərəyan maşınlarının koordinat oxlarının yerləşmə diaqramından müvafiq həndəsi çevrilmələr vasitəsi ilə daxilində k_{us} və k_{fs} tənzimləyici parametrləri olan stator gərginliyinin təşkilediciləri üçün aşağıdakı ifadələr alınmışdır:

$$\begin{aligned} U_{ds} &= 0,707 \cdot k_{us} \cdot \left[\cos(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha) - \sin(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha) \right] \\ U_{qs} &= 0,707 \cdot k_{us} \cdot \left[\cos(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha) + \sin(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

burada $k_{us} = U_s / U_{s0}$; $k_{fs} = f_s / f_{s0}$, belə ki, U_s və f_s –stator gərginliyinin modulunun və tezliyinin cari qiymətləri, U_{s0} və f_{s0} – onların baza qiymətləridir $U_{s0} = f_{s0} = 1$. Rotor dolağı üçün:

$$\begin{aligned} U_{dr} &= k_{ur} \cdot \sin(k_{fr} \cdot \tau) \\ U_{qr} &= k_{ur} \cdot \cos(k_{fr} \cdot \tau) \end{aligned} \quad (5)$$

burada $k_{ur} = U_r / U_{r0}$, $k_{fr} = f_r / f_{r0}$, $U_{r0} = f_{r0} = U_{s0} = f_{s0} = 1$.

Beləliklə, dəyişən cərəyan elektrik maşınlarının riyazi modelinin universal struktru bu maşınların bütün mümkün idarəetmə növlərini nəzərə almağa imkan verir – həm rotor tərəfindən, həm də stator tərəfindən tezliyə görə idarəetməni, həmçinin həm uzununa, həm də eninə dolaqlar üçün təsirləndirmənin tənzimlənməsini (sinxron maşınlar üçün).

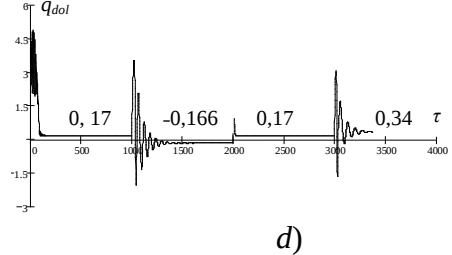
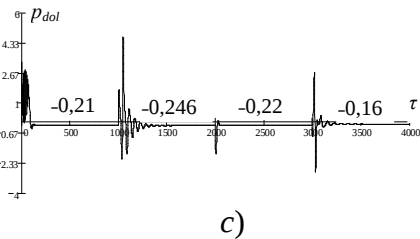
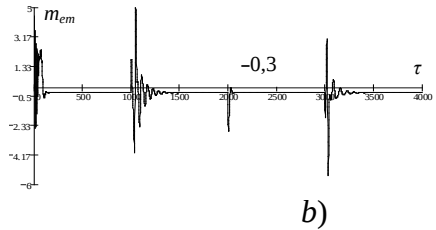
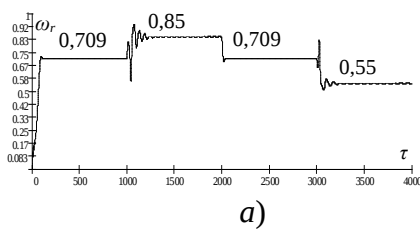
İşlənib hazırlanmış strukturda külək elektrik qurğularında rast gəlinən praktiki olaraq bütün növ dəyişən cərəyan maşınları tədqiq edilə bilər – tezliyə görə idarə olunan sinxron və asinxron maşınlar, sabit maqnitlərdən təsirləndirmə ilə sinxron maşın, uzununa-eninə təsirləndirmə ilə asinxron maşın, həm stator tərəfindən, həm də rotor tərəfindən tezliyə görə idarə olunan asinxron maşınlar.

Həm stator tərəfindən, həm də rotor tərəfindən tezliyə görə idarəetməsində işlənib hazırlanmış riyazi modelin universal strukturu əsasında aparılmış külək elektrik qurğularının bəzi dəyişən cərəyan maşınlarının hesablamə nümunələri və hesablamə nəticələrinin texniki ədəbiyyatlarda verilmiş eksperimental məlumatlarla müqayisəsi riyazi modelin universal strukturunun adekvatlığını, etibarlılığını və səmərəliliyini təsdiqləmişdir.

Şəkil 1-də həm stator tərəfindən, həm də rotor tərəfindən tezliyə görə idarəetməsində iki tərəfdən qidalanan asinxron maşının rejim parametrlərinin dəyişmə fluktoqramları göstərilmişdir. Stator tərəfindən stator dolağına tətbiq olunan gərginliyin amplitudu və tezliyi $k_{us}=k_{fs}=0,7$ olaraq təyin edilmişdir. İşə salındıqdan sonra rotorun fırlanma tezliyi $\omega_r=0,709$ qiymətində təyin olunur (ω_r qiyməti sinxron $\omega_{r0} = 0,7$ -dən çoxdur və generator rejimini göstərir) (Şəkil 1,

a). Belə halda, rotor dolağı 0–1000 radian diapazonunda qısa qapanmışdır. Elektromaqnit momenti hərəkətverici momentinə bərabərdir $m_{em}=-0,3$ (Şəkil 1, b). Müvafiq olaraq, maşınların sıxaclarındakı aktiv və reaktiv güclərin qiymətləri $p_{dol}=-0,21$ (minus işarəsi aktiv gücün şəbəkəyə verilməsini göstərir) (Şəkil 1, c) və $q_{dol}=0,17$ (reaktiv güc şəbəkədən istehlak olunur) (Şəkil 1, d).

1000–2000 radian diapazonunda rotor dolaqlarına amplitud və tezlik $k_{us}=k_{fs}=-0,15$ -ə bərabər olan gərginlik tətbiq olunur (minus işarəsi fırlanmanın sinxron tezliyindən yuxarı tənzimləməni göstərir). Müvafiq olaraq, fırlanma tezliyi $\omega_r=0,85$ -dir, maşın sıxaclarında aktiv güc $p_{dol}=-0,246$, və reaktiv güc $q_{dol}=-0,116$ (Şəkil 1, d), yəni, bu fırlanma tezliyində reaktiv güc şəbəkədən istehlak edilmir, ancaq şəbəkəyə verilir. 2000–3000 radian diapazonunda maşın ilkin rejimə qaydır, parametrlərin qiymətləri işə salındıqdan sonra, 0–1000 diapazonunda işlədikdəki kimidir. Nəhayət, 3000–4000 radian diapazonunda iki tərəfdən qidalanan asinxron maşının rotor dolağına amplitud və tezlik $\omega_r=0,55$ -ə bərabər olan gərginlik tətbiq olunur, aktiv və reaktiv güclər müvafiq olaraq $p_{dol}=-0,16$ və $q_{dol}=0,34$ -ə bərabərdir. Göstərilən fluktoqramlar tezliyə görə idarə olunan dəyişən cərəyan elektrik maşınlarının işlənilib hazırlanmış riyazi modelinin universal strukturunun istifadəsinin etibarlılığını və qanunauyğunluğunu inandırıcı şəkildə təsdiqləyir.



Şəkil 1. Həm stator tərəfindən, həm də rotor tərəfindən gərginliyin və tezliyin tənzimlənməsində iki mənbədən qidalanan asinxron maşının rejim parametrlərinin dəyişmə fluktoqramları $k_{us}=k_{fs}=0,7$ və $k_{us}=k_{fs}=\pm 0,15$

Qısa qapanmış rotorlu tezliyə görə idarə olunan asinxron maşının fəzada hərəkətsiz $\alpha_s, \beta_s, \gamma_s$ üç koordinatlı sistemində modelləşdirilmə metodu təklif edilmişdir, bu da modelin üzərində idarə olunan parametrlərin – iki koordinatlı modellərdə əks etdirilməsi çətin və ya qeyri-mümkün olan elektrik maşınlarının statorunun fazalı gərginliklərinin amplitudu və tezliyi – dəyişməsinə (tənzimlənməsinə) nisbətən asanlıqla əks etdirməyə imkan verir.

İlk dəfə tənliklər təklif olunmuş və onların əsasında ω_r rotor sürəti ilə fırlanan $\alpha_r, \beta_r, \gamma_r$, oxlarında yazılan fazalı rotor və tezlik çeviricisi olan tezliyə görə idarə olunan asinxron maşının üç koordinatlı riyazi modeli tərtib edilmişdir.

İki tərəfdən qidalanan maşın üçün hal tənliyinin genişləndirilmiş forması:

$$\begin{aligned}
 p\Psi_{sa} &= U_{sa} \cdot \sin\theta + \frac{1}{\sqrt{3}}\omega_r(\Psi_{s\beta} - \Psi_{s\gamma}) - r_s \cdot i_{sa} \\
 p\Psi_{s\beta} &= U_{s\beta} \cdot \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{\sqrt{3}}\omega_r(\Psi_{s\gamma} - \Psi_{sa}) - r_s \cdot i_{s\beta} \\
 p\Psi_{s\gamma} &= U_{s\gamma} \cdot \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{\sqrt{3}}\omega_r(\Psi_{sa} - \Psi_{s\beta}) - r_s \cdot i_{s\gamma} \\
 p\Psi_{ra} &= k_{us} \cdot \sin(k_{fr} \cdot \tau) - r_r \cdot i_{ra} \\
 p\Psi_{r\beta} &= k_{us} \cdot \sin\left(k_{fr} \cdot \tau - \frac{2\pi}{3}\right) - r_r \cdot i_{r\beta} \\
 p\Psi_{r\gamma} &= k_{us} \cdot \sin\left(k_{fr} \cdot \tau + \frac{2\pi}{3}\right) - r_r \cdot i_{r\gamma} \\
 p\theta &= 1 - \omega_r \\
 p\omega_r &= \frac{p_m}{J} \cdot (m_{em} - m_v) \\
 m_{em} &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot p_m \cdot x_m [(i_{sa} \cdot i_{r\gamma} + i_{s\beta} \cdot i_{ra} + i_{s\gamma} \cdot i_{r\beta}) - (i_{sa} \cdot i_{r\beta} + i_{s\beta} \cdot i_{r\gamma} + i_{s\gamma} \cdot i_{ra})]
 \end{aligned} \tag{6}$$

Cərəyanlar və ilişmə selləri arasındakı əlaqə aşağıdakı şəkildə göstərilir:

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{s\beta} \\ i_{s\gamma} \\ i_{ra} \\ i_{r\beta} \\ i_{r\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{sa} & -0,5x_m & -0,5x_m & x_m & -0,5x_m & -0,5x_m \\ -0,5x_m & x_{s\beta} & -0,5x_m & -0,5x_m & x_m & -0,5x_m \\ -0,5x_m & -0,5x_m & x_{s\gamma} & -0,5x_m & -0,5x_m & x_m \\ x_m & -0,5x_m & -0,5x_m & x_{ra} & -0,5x_m & -0,5x_m \\ -0,5x_m & x_m & -0,5x_m & -0,5x_m & x_{r\beta} & -0,5x_m \\ -0,5x_m & -0,5x_m & x_m & -0,5x_m & -0,5x_m & x_{r\gamma} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{s\beta} \\ \psi_{s\gamma} \\ \psi_{ra} \\ \psi_{r\beta} \\ \psi_{r\gamma} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Genişləndirilmiş şəkildə:

$$\left. \begin{aligned} i_{sa} &= k_{sa1} \cdot \psi_{sa} + k_{sa2} \cdot \psi_{s\beta} + k_{sa3} \cdot \psi_{s\gamma} + k_{sa4} \cdot \psi_{ra} + k_{sa5} \cdot \psi_{r\beta} + k_{sa6} \cdot \psi_{r\gamma} \\ i_{s\beta} &= k_{s\beta1} \cdot \psi_{sa} + k_{s\beta2} \cdot \psi_{s\beta} + k_{s\beta3} \cdot \psi_{s\gamma} + k_{s\beta4} \cdot \psi_{ra} + k_{s\beta5} \cdot \psi_{r\beta} + k_{s\beta6} \cdot \psi_{r\gamma} \\ i_{s\gamma} &= k_{s\gamma1} \cdot \psi_{sa} + k_{s\gamma2} \cdot \psi_{s\beta} + k_{s\gamma3} \cdot \psi_{s\gamma} + k_{s\gamma4} \cdot \psi_{ra} + k_{s\gamma5} \cdot \psi_{r\beta} + k_{s\gamma6} \cdot \psi_{r\gamma} \\ i_{ra} &= k_{ra1} \cdot \psi_{sa} + k_{ra2} \cdot \psi_{s\beta} + k_{ra3} \cdot \psi_{s\gamma} + k_{ra4} \cdot \psi_{ra} + k_{ra5} \cdot \psi_{r\beta} + k_{ra6} \cdot \psi_{r\gamma} \\ i_{r\beta} &= k_{r\beta1} \cdot \psi_{sa} + k_{r\beta2} \cdot \psi_{s\beta} + k_{r\beta3} \cdot \psi_{s\gamma} + k_{r\beta4} \cdot \psi_{ra} + k_{r\beta5} \cdot \psi_{r\beta} + k_{r\beta6} \cdot \psi_{r\gamma} \\ i_{r\gamma} &= k_{r\gamma1} \cdot \psi_{sa} + k_{r\gamma2} \cdot \psi_{s\beta} + k_{r\gamma3} \cdot \psi_{s\gamma} + k_{r\gamma4} \cdot \psi_{ra} + k_{r\gamma5} \cdot \psi_{r\beta} + k_{r\gamma6} \cdot \psi_{r\gamma} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Təbii olaraq, $k_{sa1} \div k_{r\gamma6}$ əmsalları maşının parametrlərindən ibarət tərs matrisdən (7) müəyyən edilir.

Beləliklə, (6) və (8) tənliklər sistemləri rotorun sürətində fırlanan $\alpha_r, \beta_r, \gamma_r$ oxlarında yazılmış tezliyə görə idarə olunan iki tərəfdən qidalanan asinxron maşının üç koordinatlı riyazi modelini təşkil edir.

Hesablamanı nümunə olaraq, əldə edilmiş nəticələrin səmərəliliyini və etibarlılığını nümayiş etdirəcəyik. Seçilmiş tədqiqat rejimi – rotorun fazalı dolaqlarının birində qırılma (kəsilmə və ya qidalandırmanın olmaması). Şəkil 2-də iki tərəfdən qidalanan maşının rejim parametrlərinin dəyişmə fluktoqramları göstərilir, onun riyazi modeli ω_r rotor sürəti ilə fırlanan $\alpha_r, \beta_r, \gamma_r$ üç koordinatlı sistemində qurulmuşdur.

Şəkil 2-də (a, b, c, d, e, f, k, h) müvafiq olaraq maşının fırlanma tezliyi ω_r (Şəkil 2, a), maşının elektromaqnit momenti m_{em} (Şəkil 2, b), statorun faza cərəyanları $I_{sa}, I_{s\beta}, I_{s\gamma}$ (Şəkil 2, c, d, e) və rotorun cərəyanları $I_{ra}, I_{r\beta}, I_{r\gamma}$ (Şəkil 2, f, k, h) göstərilir.

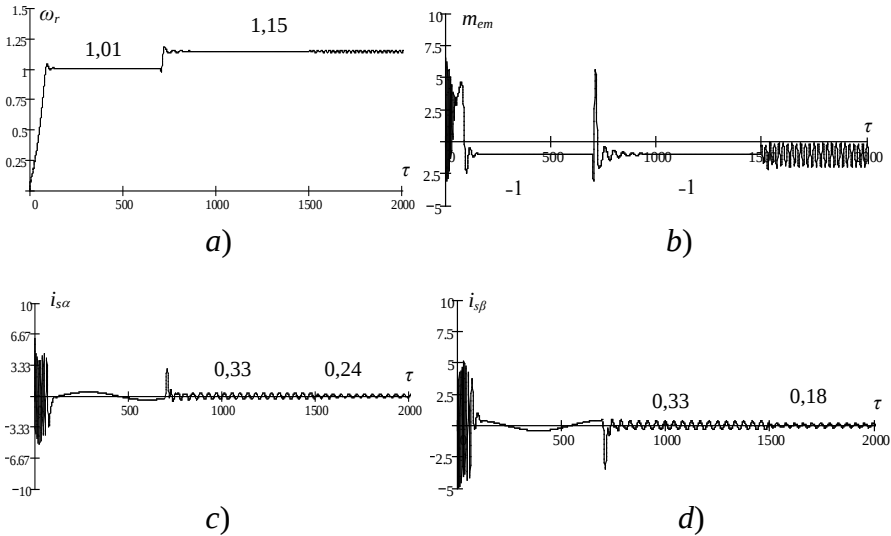
0–700 radian diapazonunda rotor dolaqlarının qısaqapanmış halında valda hərəkətverici moment $m_T = -1$ -ə bərabər olan elektrik maşınının birbaşa qoşulması həyata keçirilir.

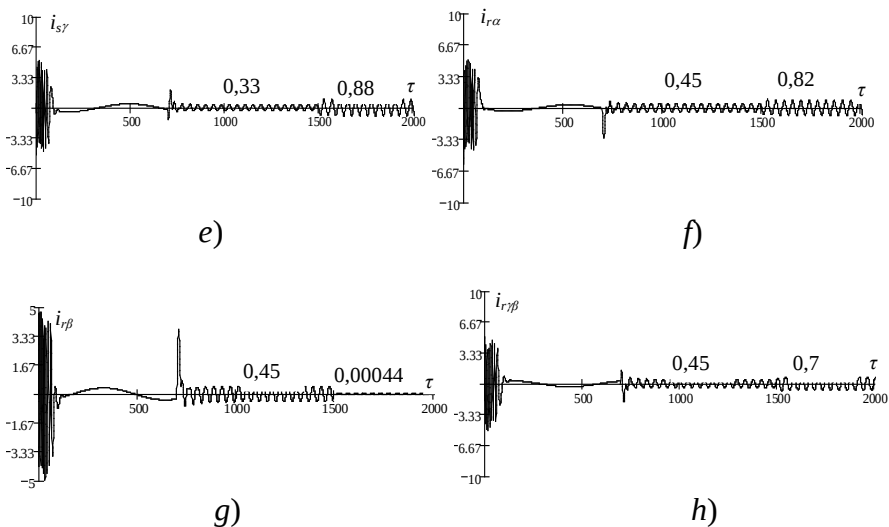
700-cü radianda gərginlik hər üç faza üçün bərabər olan amplitud və tezlik qiymətləri ilə $k_{ur} = k_{fr} = -0,15$ tezlik çeviricisindən üç fazalı rotor dolağına verilir.

Əlavə olaraq, rotorun fırlanma tezliyi $\omega_r = 1,15$ qiymətinə artır, stator və rotor cərəyanları müvafiq olaraq simmetrikdir və $I_{s\alpha} = I_{s\beta} = I_{s\gamma} = 0,33$ və $I_{r\alpha} = I_{r\beta} = I_{r\gamma} = 0,45$, elektromaqnit momentinin qiyməti $m_{em} = m_T = -1$ (maşın generator rejimində işləyir).

1500 radianda generatorun rotorunun β fazasının qırılma rejimi imitasiya olunur. Eyni zamanda, maşında rotorun fırlanma tezliyinin (ω_r) və m_{em} momentinin ayrılərində yüksək tezlikli rəqslərlə qeyri-simmetrik iş rejimi formalaşır.

Stator cərəyanları qeyri-simmetrik olur $I_{s\alpha} = 0,24$, $I_{s\beta} = 0,18$, $I_{s\gamma} = 0,88$. Rotor cərəyanları da qeyri-simmetrikdir $I_{r\alpha} = 0,82$, $I_{r\beta} \approx 0$ (qırılma məhz bu fazada imitasiya olunub), $I_{r\gamma} = 0,7$.





Şəkil 2. Rotor tərəfindən idarədilməkdə üç koordinatlı riyazi modeldə əldə edilmiş iki tərəfdən qidalanan asinxron maşının rejim parametrlərinin dəyişmə fluktoqramları $k_{ur}=k_{fr}=0,15$

İkinci fəsildə həm elektromağnit təsirləndirmə, həm də sabit maqnitləri olan tezliyə görə idarə olunan sinxron maşınların modelləşdirilməsi üçün işlənib hazırlanmış metod təqdim olunur, həm də, onlar külək energetikasında daha çox istifadə olunur¹⁵.

Sabit maqnitli tezliyə görə idarə olunan sinxron maşının tənliklərini çıxardıqda, məlum olan və aprobasiya edilmiş Park-Gorev tənlikləri əsas götürülür. Belə halda, tənliklər ilişmə sellərinin və nəzarət olunan cərəyanların törəmələrinə nisbətən yazılır (ilişmə selləri özlərindən və bu cərəyanlardan olan funksiyalar kimi). Bu tənlikləri sabit maqnitli sinxron maşınların tənliklərinə çevirmək üçün, təbii olaraq, təsirləndirmə dolağının ilişmə selinin törəməsini $p\Psi_{df}=0$ sifra bərabərləşdirmək lazımdır, o zaman gərginliklər balansı tənliyindən təsirləndirmə dolağındakı cərəyan aşağıdakı kimi olar:

¹⁵ Heng, T. Y., Ding, T. J., Chang, C. C. W., et al. Permanent Magnet Synchronous generator design optimization for wind energy conversion system: A review // Energy Reports. – 2022. Vol. 8, Sup. 16, – p. 277-282.

$$i_{df} = \frac{U_{df}^*}{x_{ad}} \quad (9)$$

Bu cərəyanın qiymətlərini maşının qalan tənliklərinə daxil edərək və onun qiymətlərini ilişmə selləri ilə birləşdirən i_{df} üçün tənliyi xaric edərək, sabit maqnitli sinxron maşının tənliklərini əldə edirik. Lakin, yeni tənliklərdə U_{df}^* gərginliyi təsirləndirmə gərginliyi kimi deyil, həcm vahidinə istinad edilən maqnit enerjisi və ya qalıq induksiyanın kiçik qiymətlərində maqnitin koersitiv qüvvəsi kimi şərh edilməlidir (bundan sonra M_f simvolu ilə işarələnir). Məsələn, $U_{df}^*=1$ kimi maqnit enerjisinin belə qiymətini qəbul etmək lazımdır ki, generatorun yüksüz işləməsində onun sıxaclarında $e_{xx}=1$ -ə bərabər olan EHQ-nin qiymətini təmin edə bilsin^{16,17}.

Bundan başqa, tezliyə görə idarə olunan sinxron maşınlardan bəhs etdiyimiz üçün, Park-Qorev tənliklərini belə adaptasiya etmək lazımdır ki, onlar külək elektrik qurğularında sinxron generatorunun sıxaclarında gərginliyin həm amplitudunun, həm də tezliyinin dəyişməsinə əks etdirlərsinlər. Şəkil 3-dəki diaqramla müraciət edək.

Burada α_0, β_0 – fəzada sabitlənmiş koordinat oxları; α_s, β_s – tezlik çeviricisinin çıxışındakı cərəyanın tezliyinə uyğun bucaq tezliyinə görə sinxron olaraq fırlanan oxlar; d, q – ω_r rotor sürətində fırlanan koordinat oxları; $\alpha_s = \omega_s \cdot \tau - \alpha_s, \beta_s$ və α_0, β_0 oxların arasındakı bucaq; d, q oxları ilə α_0 hərəkətsiz oxlar arasındakı bucaq, $\beta_0 = \omega_r \cdot \tau - \alpha_0$ bərabərdir və nəhayət, θ – d, q oxları ilə α_s, β_s oxları arasındakı bucaqdır.

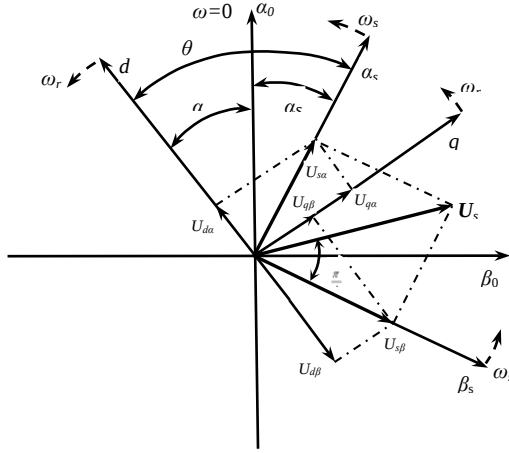
Diaqramdan aşağıdakını əldə edirik:

$$\theta = \alpha + \alpha_s = \omega_r \cdot \tau + \omega_s \cdot \tau \quad (10)$$

burada $\tau = \omega_{baz} \cdot t = 314 \cdot t$ – sinxron vaxtı [radian], t – vaxt [dəqiqə].

¹⁶ Иванов, П. А., Смирнов, В. Л. Исследование характеристик синхронных машин с постоянными магнитами в ветроэнергетике. – Москва: Энергия, – 2015. – 220 с.

¹⁷ Gajewski, P., Pienkowski, K. Analysis of sliding mode control of variable speed wind turbine system with PMSG // In 2017 International Symposium on Electrical Machines (SME), – 2017, – p. 1-6.



Şəkil 3. Dəyişən cərəyan maşınlarının koordinat oxlarının yerləşmə diaqramı

U_s gərginlik vektorunu ilkin (başlanğıc) rejimində α_s, β_s oxlarına 45° bucaq altında yerləşdirsək, bu oxlara onun proyeksiyaları eyni və $U_{s\alpha_0} = U_{s\beta_0} = 0,707 \cdot U_s$ -ə bərabər olacaq ($U_s = 1$ -də).

Bu proyeksiyaların d, q oxlarına proyeksiyası:

$$\left. \begin{aligned} U_{da} &= U_{sa} \cdot \cos \theta = U_{sa} \cdot \cos(\alpha + \omega_s \cdot \tau) \\ U_{qa} &= U_{sa} \cdot \sin \theta = U_{sa} \cdot \sin(\alpha + \omega_s \cdot \tau) \\ U_{d\beta} &= U_{s\beta} \cdot \sin \theta = U_{s\beta} \cdot \sin(\alpha + \omega_s \cdot \tau) \\ U_{q\beta} &= U_{s\beta} \cdot \cos \theta = U_{s\beta} \cdot \cos(\alpha + \omega_s \cdot \tau) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Bu vektorların d, q oxlara ümumi proyeksiyaları:

$$\left. \begin{aligned} U_{ds} &= U_{da} - U_{d\beta} \\ U_{qs} &= U_{qa} + U_{q\beta} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$k_{us} = \frac{U_s}{U_{s0}}$ və $k_{fs} = \frac{\omega_s}{\omega_{s0}}$ nəzərdə tutaraq, burada $U_{s0} = 1$ nisbi

vahidlərdədir, aşağıdakıları alırıq:

$$\left. \begin{aligned} U_{ds} &= 0,707 \cdot k_{us} [\cos(\alpha + k_{fs} \cdot \tau) - \sin(\alpha + k_{fs} \cdot \tau)] \\ U_{qs} &= 0,707 \cdot k_{us} [\sin(\alpha + k_{fs} \cdot \tau) + \cos(\alpha + k_{fs} \cdot \tau)] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Nəhayət, trivial dəyişdirilmələr vasitəsilə aşağıdakıları almaq olar:

$$\left. \begin{aligned} U_{ds} &= 0,707 \cdot k_{us} \left[\cos(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha) - \sin(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha) \right] \\ U_{qs} &= 0,707 \cdot k_{us} \left[\cos(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha) + \sin(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha) \right] \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Beləliklə, külək elektrik qurğularının sabit maqnitli sinxron generatorunun rəqəmsal modeli aşağıdakı şəkildə olacaqdır:

$$\left. \begin{aligned} p\Psi_{ds} &= U_{sd} - \omega_r \cdot \Psi_{qs} - r_s \cdot i_{ds} \\ p\Psi_{qs} &= U_{sq} + \omega_r \cdot \Psi_{ds} - r_s \cdot i_{qs} \\ p\Psi_{dr} &= -\frac{r_{dr}}{x_{dr}} \cdot \Psi_{dr} + \frac{r_{dr} \cdot x_{ad}}{x_{dr}} \cdot i_{ds} + \frac{r_{dr}}{x_{dr}} \cdot M_f^* \\ p\Psi_{qr} &= -\frac{r_{qr}}{x_{qr}} \cdot \Psi_{qr} + \frac{r_{qr} \cdot x_{aq}}{x_{qr}} \cdot i_{qs} \\ p\omega_r &= \frac{1}{T_j} \cdot m_{wt} - \frac{1}{T_j} \cdot m_{em} \\ p\alpha &= \omega_r \\ m_{em} &= \Psi_{ds} \cdot i_{qs} - \Psi_{qs} \cdot i_{ds} \\ i_{ds} &= \frac{x_{dr}}{\Delta d} \cdot \Psi_{ds} - \frac{x_{dr} - x_{ad}}{\Delta d} \cdot M_f^* - \frac{x_{ad}}{\Delta d} \cdot \Psi_{dr} \\ i_{qs} &= \frac{x_{qr}}{\Delta q} \cdot \Psi_{qs} - \frac{x_{aq}}{\Delta q} \cdot \Psi_{qr} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

burada M_f – həcm vahidinə aid edilmiş maqnit enerjisi (qalıq induksiyasının kiçik qiymətlərində – maqnitlərin koersitiv qüvvəsidir); $\Delta d = x_{ds} \cdot x_{dr} - x_{ad}^2$, $\Delta q = x_{qs} \cdot x_{qr} - x_{aq}^2$.

(15) tənliyinə aşağıdakı şəkildə təmsil olunan külək elektrik qurğularının aktiv və reaktiv gücləri üçün tənliklər əlavə etmək lazımdır:

$$\left. \begin{aligned} p &= U_{ds} \cdot i_{ds} + U_{qs} \cdot i_{qs} \\ q &= U_{qs} \cdot i_{ds} - U_{ds} \cdot i_{qs} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Göstərilən modeldə, "Vensys 77" tipli külək qurğusunun¹⁸ $P_n=1500$ kVt sabit maqnitli generatorunun iş rejimləri tədqiq edilmişdir. Əlavə olaraq, küləyin hesablanma sürəti 13 m/s-dir, küləyin başlanğıc sürəti 3 m/s-dir və yol verilən maksimal sürət 22 m/s-dir. Külək çarxının fırlanma tezliyinin tənzimləmə diapazonu 9–

¹⁸ Windenergie 2006. BWE – Service GmbH. – 2006.

17,3 dövr/m-dir, yəni təxminən 1:2. Tədqiqatlar $M_{df}=1,2=\text{const}$, külək mühərrikinin hərəkətverici momentinin aşağıdakı ifadə ilə təyin olunduğu fərziyyəsi altında aparılmışdır:

$$m_{kq} = k_M \cdot \omega_r^2 \quad (17)$$

Qeyd etmək lazımdır ki, bu ifadə yalnız fırlanma tezliyinin tənzimləmə diapazonunda “işləyir”.

Qərarlaşmış rejimdə bu diapazonda tədqiqat üç idarəetmə üsulu ilə aparılmışdır:

a) generatorun stator dolağına verilən gərginliyin amplitudunun və tezliyinin dəyişmə əmsalları bərabər olduqda idarəetməsi, yəni $k_{us}=k_{fs}$; b) reaktiv gücün verilməsinin sabitliyinin idarəetməsi; c) güc əmsalının sabitliyinin idarəetməsi $\cos\varphi \approx 1$. Nəticələr aşağıda əks olunur:

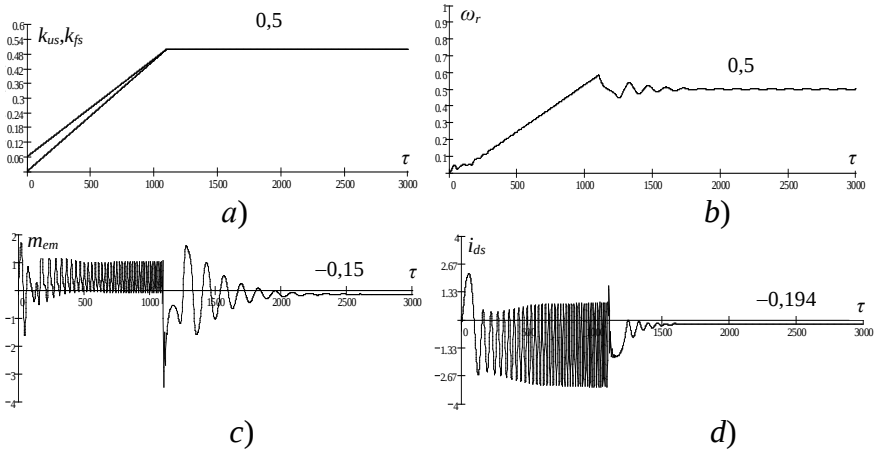
a) $k_u = k_f$ -də idarəetmə						
$k_u = k_f$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
m	-0,150	-0,215	-0,296	-0,389	-0,486	-0,598
p	-0,074	-0,128	-0,205	-0,304	-0,435	-0,596
q	-0,137	-0,158	-0,175	-0,180	-0,177	-0,155
i_{ds}	-0,200	-0,200	-0,210	-0,220	-0,234	-0,257
i_{qs}	-0,136	-0,197	-0,265	-0,346	-0,441	-0,543
b) Reaktiv gücün sabitliyinin tənzimlənməsi $q = \text{const}$						
k_f	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
k_u	0,484	0,592	0,698	0,799	0,899	0,991
q	-0,179	-0,180	-0,180	-0,181	-0,180	-0,179
i_{ds}	-0,270	-0,232	-0,216	-0,217	-0,237	-0,257
c) Reaktiv gücün sabitliyinin tənzimlənməsi $\cos\varphi \approx 1$						
k_f	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
k_u	0,545	0,650	0,758	0,860	0,960	1,055
q	-0,0017	-0,0017	-0,00173	-0,0017	-0,0018	-0,0017
i_{ds}	-0,01	-0,0187	-0,033	-0,055	-0,089	-0,137

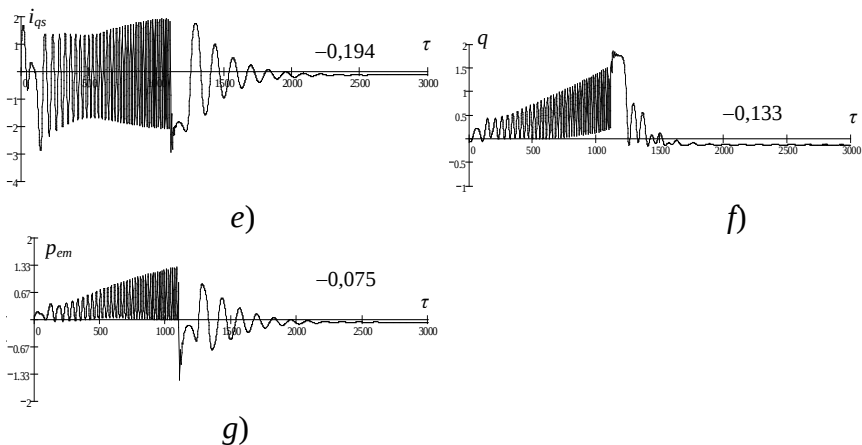
Bu məlumatların analizindən məlum olur ki, ω_r fırlanma tezliyinin kvadratı ilə mütənasib olan moment bütün idarəetmə halları üçün şəbəkə cərəyanının tezliyi ilə təyin olunur və k_{fs} tezliyi 0,5-dən 1-ə dəyişəndə, o -0,15-dən -0,6-ya dəyişir. Bu momentə -0,074-dən -0,6-i diapazonunda dəyişən p aktiv gücü və -0,136-dən -0,543-i

diapazonunda dəyişən i_{qs} aktiv cərəyan uyğundur. Bu qiymətlər bütün rejimlər üçün eynidir.

Maraqlıdır ki, 0,65–0,9 tezliyin dəyişmə diapazonunda $k_{us}=k_{fs}$ qanununa görə və $q=\text{const}$ reaktiv gücün sabitliyinin tənzimlənməsi zamanı, parametrlərin qiymətləri bir-birindən az fərqlənir.

Külək elektrik qurğularının sabit maqnitli sinxron generatorunun tezliyə görə işə salınma rejiminin tədqiqi maraq kəsb edir, onun fluktoqramı Şəkil 4-də göstərilmişdir. İşəsalma $V_{i\dot{s}.s}=4,5$ m/s küləyin başlanğıc sürətinə uyğun olan $m_h=-0,15$ -ə bərabər olan generator valında hərəkətverici momenti olduqda həyata keçirilir. Stator cərəyanının gərginliyin amplitudu və tezliyi xətti qanuna uyğun dəyişir, əlavə olaraq, $\omega_r=f(\tau)$ üçün "ölü zona"-nı seçmək məqsədilə, $k_{us}=f(\tau)$ sürətlənmənin başlanğıcında $k_{fs}=f(\tau)$ -ni bir qədər qabaqlayır. Sinxronizasiyaya keçmə prosesi 2000 radianda başa çatır. Amplitudun və tezliyin qərarlaşmış rejiminə çıxma vaxtı ($k_{us}=k_{fs}=1$) 1100 radiandır (3,5 dəqiqə). Elektromaqnit momentinin diapazonu m_{em} 2-qat qiymətləri aşmır, baxmayaraq ki, sürətlənmə zamanı onun orta qiyməti $m_{ort.em}=0,5$ -ə bərabərdir. i_{ds} və i_{qs} cərəyanlarının amplitudları, həmçinin q və p reaktiv və aktiv güclərinin qiymətləri 2-qat qiymətləri aşmır. Bütün bunlar külək elektrik qurğularında sabit maqnitli sinxron generatorunun istifadəsinin yüksək səmərəliliyini təsdiqləyir.





Şəkil 4. Tezliyə görə işə salınmasında külək elektrik qurğularının sabit maqnitli sinxron generatorunun rejim parametrlərinin dəyişmə fluktoqramları

Həmçinin, külək elektrik qurğularının elektromaqnit təsirləndirməsi olan sinxron generatorunun və külək elektrik qurğularının sabit maqnitli sinxron generatorlarının tənzimləmə xüsusiyyətlərinin müqayisəli analizi aparılmışdır.

Külək elektrik qurğularının elektromaqnit təsirləndirməsi və sabit maqnitləri olan sinxron generatorlarının reaktiv gücün çıxışının sabitliyi $q = \text{const}$ və güc əmsalının sabitliyi $\cos\varphi \approx 1$ üçün tənzimləmə qanunlarını müqayisə edərək aşağıdakıları qeyd etmək olar:

- elektromaqnit təsirləndirmə ilə sinxron generator üçün stator cərəyanın tezliyinin 0,5-dən 1-ə qədər dəyişmə diapazonunda ($k_{us} = k_{fs}$), $\cos\varphi \approx 1$ -i təmin etmək üçün təsirləndirmə gərginliyini stator cərəyanın tezliyinin dəyişməsi funksiyasında praktiki olaraq xətti dəyişdirmək lazımdır. Başqa qanunu tətbiq edərkən – reaktiv gücün $q = \text{const}$ çıxışının sabitliyinin saxlanması, tənzimlənən funksiya $q = f(k_{fs})$ əhəmiyyətli dərəcədə qeyri-xəttlidir.

- $\cos\varphi \approx 1$ -i təmin etmək üçün stator cərəyanının eyni tezlik diapazonunda külək elektrik qurğularının sabit maqnitli sinxron generatoru üçün, generatorun stator dolağını qidalandıran tezlik çeviricisinin gərginliyinin amplitudunu tezliyin dəyişməsi funksiyasında aşağı tezliklər sahəsində az diklik ilə praktiki olaraq

xətti tənzimləmək lazımdır. $q=\text{const}$ tənzimləmə qanunu həyata keçirildikdə, əyrinin forması $\cos\varphi\approx 1$ -də tənzimlədikdə olduğu kimi qalır, yalnız əyri yuxarıda yerləşir. Yəni, hər iki əyri konqruentlik saxlayır.

Külək elektrik qurğularının sabit maqnitli sinxron generatorunun dinamikasını öyrənərkən, sistemin nazım çarx kütlələrinin (inersiya sabit T_j) prosesin xarakterinə təsirinin müəyyənləşdirilməsi maraqlıdır, çünki göstərilən elektromexaniki çeviricilər ilə reduktorlu və reduktorsuz (Ringgenerator adlandırılan) külək elektrik qurğularında istifadə olunur. Bundan başqa, maqnitin maqnit enerjisinin qiymətinin keçid proseslərə təsirini öyrənmək mümkün olur. Bu, küləyin ani şiddətlər zamanı külək enerjisi potensialı ilə xarakterizə olunan müxtəlif bölgələrdə işləmək üçün külək elektrik qurğularının sabit maqnitli sinxron generatorlarının layihələndirilməsi üçün xüsusilə vacibdir.

Dinamikanın tədqiqi zamanı, külək sürətlərinin sıçrayışlı dəyişməsinin ideallaşdırılmış modeli¹⁹ (avtomatik idarəetmə nəzəriyyəsində həyəcanlanmış təsirinin göstərilən dəyişmə nümunəvidir) və daha əvvəl təklif olunan Azərbaycan Respublikasının Abşeron bölgəsində külək sürətinin dəyişməsinin əldə edilmiş real fluktoqramların əsasında sintezləşdirilən dinamikada külək sürətinin dəyişməsinin trapesiya şəkilli forma ilə tədqiqatlar aparılmışdır²⁰.

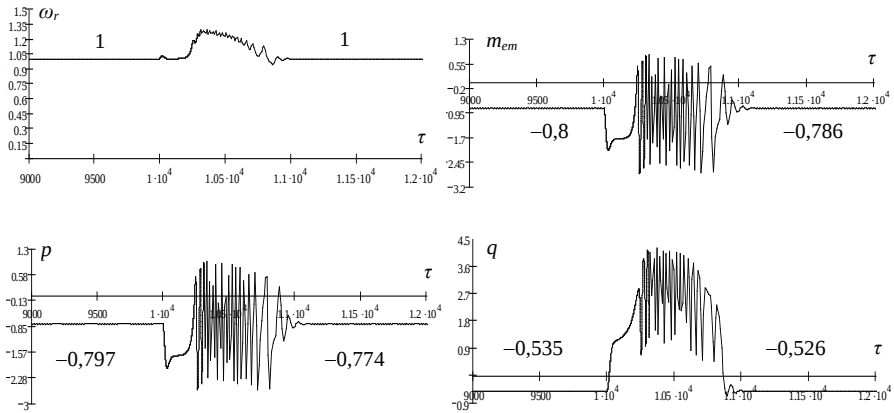
Şəkil 5-dəki, a fluktoqramlar $T_j\approx 1$ saniyə (333,3 radian) ilkin məlumatlar və maqnitlərin enerjisi $M_f=1,8$ üçün "GE Energy" tipli²¹ külək elektrik qurğusunun işini imitasiya edən sabit maqnitli generatorun rejim parametrlərinin dəyişmələrini göstərir, bu da

¹⁹ Андрианов, В.Н. Ветроэлектрические станции / В.Н. Андрианов, Д.Н.Быстрицкий, К.П.Вашкевич и др. – Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, – 1960. – 319 с.

²⁰ Гасанова, Л.Г. Моделирование и исследование режимов работы системных ветроэлектрических установок с асинхронными генераторами при частотном управлении: / Диссертация на соискания ученой степени кандидата технических наук. / – Баку, – 2008. – 159 с.

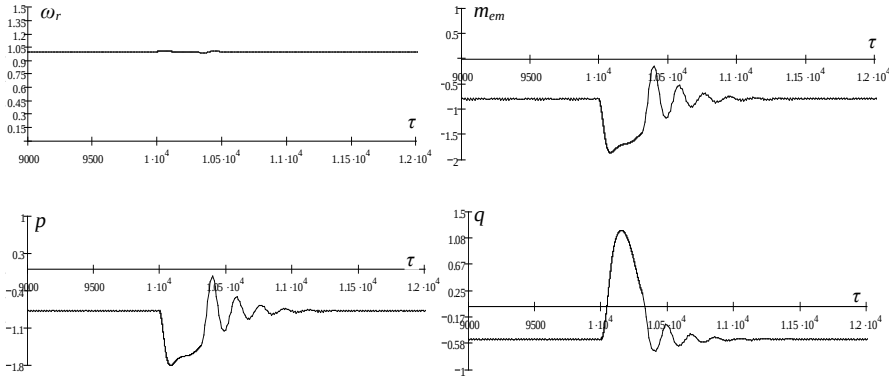
²¹ GE Renewable Energy. [Electronic resource] / A challenge—and an opportunity. Ready for tomorrow. – 2020. / URL: www.ge.com/renewableenergy/wind-energy

$\cos\varphi=0,8$ ($\operatorname{tg}\varphi=0,75$) qabaqlayıcı qiymətinə uyğun gəlir. Külək mühərrikinin hərəkətverici momentinin təqribən ikiqat qiymətinin sıçrayış rejimi modelləşdirilir, yəni hərəkətverici moment 10000 radianda $m_{em}=-0,8$ (nominal qiymət) qiymətindən $m_h=-1,75$ qiymətinə qədər sıçrayışlı artır. Bu, sürəti $V_{hes.}=13$ m/s-dən $V_{max}=19$ m/s-ə qədər kəskin şəkildə dəyişən küləyin ani şiddətinə uyğundur, əlavə olaraq, küləyin ani şiddətinin müddəti 1 saniyədir (314 radian). Fluktoqramın analizindən elə nəticə çıxarmaq olar ki, sistem dinamik baxımından sabitdir, baxmayaraq ki, tezlik və amplitud üzrə rəqslər əhəmiyyətli qiymətlərə çatır ($q_{max}=3,5$). Moment sıçrayışının qiyməti $>1,75$ olduqda generatorun sinxronizmdən çıxmasını da qeyd etmək lazımdır.



Şəkil 5, a. "GE Energy" tipli sistemi modelləşdirilən külək elektrik qurğularının model sinxron generatorunun keçid proses parametrlərinin fluktoqramları

Şəkil 5, b-də külək elektrik qurğularının fırlanan hissələrinin ətalət sabiti əhəmiyyətli dərəcədə artdıqda ($T_j=5$ saniyə) rejim parametrlərinin dəyişmə fluktoqramları göstərilmişdir, bu da müvafiq sabit maqnitli generatorları ilə reduktorsuz külək elektrik qurğuların işini müəyyən dərəcədə imitasiya edir.



Şəkil 5, b. Külək elektrik qurğularında sabit maqnitli sinxron generatorunun rejim parametrlərinin dəyişmə fluktoqramları

Fluktoqramlar göstərir ki, bu halda rejim parametrlərinin maksimal qiymətləri əhəmiyyətli dərəcədə azalır, məsələn, $q_{\max} \approx 1$ və onların rəqslərinin tezlikləri. ω_r fırlanma tezliyinin əyrisində praktiki olaraq heç bir rəqs yoxdur.

Generatorun sabit maqnitlərinin maqnit enerjisinin onun dinamik xüsusiyyətlərinə təsirini tədqiq edərkən məlum oldu ki, M_f qiyməti nə qədər böyükdürsə, maşın həyəcanlanmış təsirlərin dəyişməsinə o qədər davamlıdır. Beləliklə, $\cos\varphi=0,9$ -a (qabaqlayan) uyğun gələn $M_f=1,62$ üçün, $T_f \approx 1$ saniyəyə uyğun nazim çarx kütlələrinin qiymətlərində generator artıq $m_h=-1,65$ -də sinxronizmdən çıxır və xeyli nazim çarx kütlələrdə ($T_f \approx 5$ saniyə) maşın $m_h=-1,6$ -da asinxron rejimə keçir. Maşın $\cos\varphi=1$ (buna $M_f=1,3$ uyğundur) üçün layihələndirildiyi halda bu daha da nəzərə çarpır. Burada $m_h=-1,3$ və $T_f \approx 5$ saniyədə generator asinxron rejimə keçir və $T_f \approx 1$ saniyədə və $m_h=-1,45$ -də sinxronizmdən çıxır ki, bu da $V_{\max}=17,5$ m/s bərabər külək sürətinə uyğundur. Bu vəziyyət külək elektrik qurğularının sinxron generatorunun stator və rotor dövrələri arasındakı elektromaqnit əlaqəsinin gücləndirilməsinin dinamik sabitliyinə əlverişli təsir göstərdiyini (yəni artır) göstərir.

Məlumdur ki, havanın sıçrayışlı dəyişə bilməyən kütlə sıxlığı var; bu səbəbdən küləyin sürətinin dəyişmə dinamikasının ən adekvat

təsviri küləyin ani şiddətlərinin trapesiya-şəkilli təqdimetmə formasıdır. Tədqiqatlar göstərdi ki, küləyin ani şiddətlərinin belə göstərilməsində, sabitliyə trapesiyanın həm artan, həm də düşən qollarında küləyin artma sürəti təsir edir. Bu tədqiqatlar zamanı bir xüsusiyyət meydana çıxdı. Məsələn, küləyin ani şiddətindən əvvəl külək elektrik qurğularının sinxron maşını $\omega_r=0,7$ (bu halda $m_h=-0,5$) fırlanma tezliyə görə işləmişdirsə və sonra $t=0,5$ saniyə müddətində küləyin sürəti artıbsa (buna külək mühərrikinin hərəkətverici momentinin $m_h = -0,5$ -dən $m_h=-1,7$ -ə artımı uyğun gəlir) və sonra $\Delta t=1$ saniyə müddətində dəyişməz olaraq qalırsa, sonra $0,5$ saniyə ərzində $m_{son}=-0,5$ qiymətinə xətti şəkildə azalırsa (yəni başlanğıc qiymətinə qayıdırsa), onda külək elektrik qurğularının generatoru $T_j=5$ saniyədən sinxronizmdə qalır. Lakin, trapesiyanın düşən qolundan sonra momentin $m_{son}=-0,8$ -ə artmasına təşəbbüs edildikdə, maşın sinxronizmdən çıxır. Beləliklə, sabitlik yalnız külək sürətinin artma və enmə dərəcələrindən və onun maksimal qiymətindən deyil, küləyin ani şiddətindən sonra qərarlaşmış külək sürətinin qiymətindən də asılıdır.

Külək elektrik qurğularının sabit maqnitli sinxron generatorunun dinamik dayanıqlığını artırmaq üçün, keçid proseslərinin xarakterinə bu və ya digər dərəcədə təsir göstərə biləcək iki idarəetmə kanalı var. Bu, külək mühərrikinin pərlərinin dönmə bucağının tənzimlənməsi və generatorun stator cərəyanının tezliyinin tənzimlənməsidir (onun stator dolağına qoşulmuş tezlik çeviricisi vasitəsilə). Küləyin ani şiddətləri 1–2 saniyə davam etdikdə, külək mühərriklərinin pərlərinin dönmə bucağının dəyişdirmə yolu ilə gücün tənzimlənməsi cüzi təsirə səbəb olur, çünki sistemli külək elektrik qurğularının böyük əksəriyyəti üçün göstərilən idarəetmə kanalının vaxt sabiti olduqca böyükdür. Bu səbəbdən dinamikada yeganə idarəetmə kanalı, koersitiv qüvvəsi $M_f=1,8$ -ə bərabər olan ($\cos\varphi=0,8$ qabaqlayana uyğun olan) və $T_j\approx 5$ saniyədə olan külək elektrik qurğularının sabit maqnitli sinxron generatorlarının tezlik çeviricisindən istifadə edərək generatorun statorunun cərəyanının tezliyinin tənzimlənməsidir, nominal yüklə işləyərkən o $V_{kül.əsm.}=21$ m/s ($m_h=-2,1$ -ə uyğundur) bərabər olan küləyin ani şiddətinə məruz qalmışdır, küləyin ani

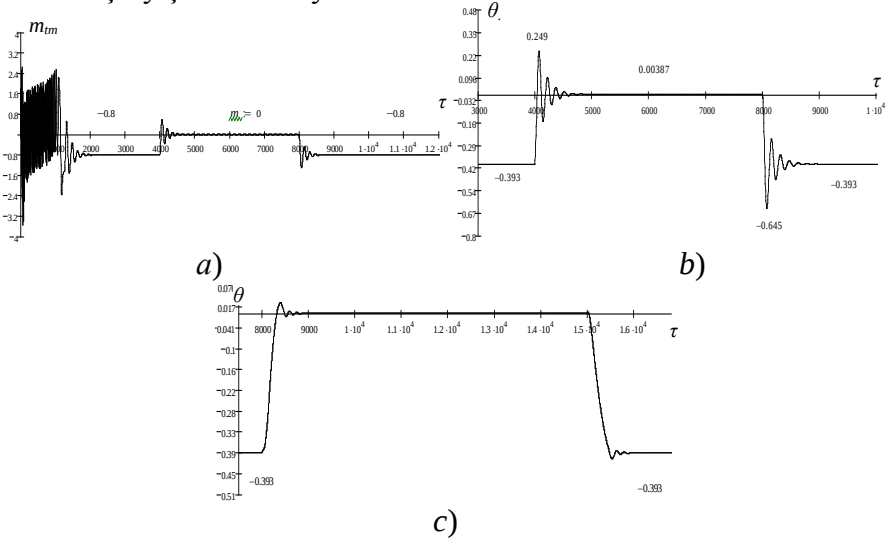
şiddətinin müddəti $\Delta t_{k\ddot{u}l.\ddot{a}sm.}=1$ saniyəyə bərabərdir (314 radian). Küləyin ani şiddətinin başlamasından yarım saniyə sonra, statorun cərəyanının tezliyinin tənzimlənmə prosesi başladı, hansı ki, $k_{fs}=1$ qiymətindən $k_{fs}=0,8$ qiymətinə qədər azaldı (müvafiq olaraq generatorun rotorunun fırlanma tezliyi də $\omega_r=1$ -dən $\omega_r=0,8$ -ə qədər düşdü). Müəyyən müddətdən sonra statorun cərəyanının tezliyi $k_{fs}=1$ orijinal qiymətinə qaytarılmışdır. Statorun cərəyanının tezliyinin bu cür tənzimlənməsi (azaldılması) sinxron maşının sinxronizmdə qalmasına imkan verir. Bu rejimin çoxsaylı fluktoqramlar, maşının sabit qalması (və ya təkrar sinxronlaşdırılması) üçün statorun cərəyanının tezliyində azalma məhdudiyyəti olduğunu aşkar etməyə imkan verdi. Məsələn, k_{fs} tezliyi $k_{fs}=0,95$ və ya $k_{fs}=0,9$ qiymətinə endirildikdə, maşın təkrar sinxronlaşdırılır; yalnız $k_{fs}=0,8$ və daha aşağı olduqda sinxron rejim bərpa olunur. Bundan başqa, küləyin ani şiddəti bitdikdən və əvvəlki vəziyyətinə qayıtdıqdan sonra idarəetmə parametri (statorun cərəyanının tezliyi k_{fs}) ilkin rejimin qiymətinə qədər (yəni $k_{fs}=1$ -ə qədər) bərpa etmək üçün müəyyən vaxt tələb olunur.

Növbəti vacib məsələ – külək elektrik qurğularının sabit maqnitli tezliyə görə idarə olunan sinxron maşınlarının rotorlarının rəqslərinin dempferlənməsidir. Dissertasiyada rəqslərin dempferlənməsi üçün Pontryaginın maksimum prinsipinə əsaslanan idarəetmədən istifadə edilmişdir^{22,23}. Stator dolağına tətbiq olunan gərginliyin amplitudu k_{us} və tezliyi k_{fs} tədqiq olunan sistemdə idarəetmə parametrləri kimi seçilmişdir. Xatırladaq ki, sistemin fazalı koordinatlarını bir sərbəst vəziyyətdən digərinə köçürmək üçün yol verilən idarəetmə əvvəlcə sistemin hərəkətini müəyyən müddətdə “sürətləndirməlidir” (və ya “tormozlamalı”), sonra da növbəti vaxt aralığında onu “tormozlamalıdır” (və ya “sürətləndirməli”). Beləliklə, $k_{us}=k_{fs}$ -i

²² Соколов, М.М. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе / М.М. Соколов, Л.П. Петров, Л.В. Масандилов [и др.] – Москва: Энергия, – 1967. – 201 с.

²³ Петров, Ю.П. Использование «принципа максимума» для нахождения оптимального закона регулирования синхронных машин // – Москва: Электричество, – 1964. №10, – с. 45-48.

idarəetmə koordinatları olaraq seçərkən və texniki səbəblərdən onların dəyişmə diapazonunu 10%-a qədər məhdudlaşdırdıqda, idarəetmə zamanı onlar $\Delta k_{us} = \Delta k_{fs} = \pm 0,1$ ($k_{us} = k_{fs} = 1$ nominal qiymətlərdə) qiymətinə dəyişə biləcəyini müəyyənləşdirdik. Şəkil 6-da m_h elektromaqnit momentinin (onun atılma və sıçrayış zamanı) dəyişmə fluktoqramları göstərilmişdir (Şəkil 6, a). Şəkil 6 (b)-də idarə olunmayan sinxron maşının θ daxili bucağının dəyişmə fluktoqramı göstərilmişdir, yəni sabit qiymətlərdə $k_{us} = k_{fs} = 18000$ radianda moment $m_h = -0,8$ -dən $m_h = 0$ -a atılır. Bu halda, rəqslərdən sonrakı bucaq $\theta \approx 0$ olaraq müəyyənləşir və bucağın maksimal çıxması 65%-dir, yükün təkrar sıçrayışı zamanı eyni mənzərə müşahidə olunur.



Şəkil 6. Pontryaginın prinsipinə əsaslanan idarəetmə ilə külək elektrik qurğularının hərəkətverici momentinin atılma və sıçrayış zamanı rəqslərin dempferlənməsi

Şəkil 6 (c)-də Pontryaginın maksimum prinsipinə uyğun olaraq idarəetmə zamanı θ bucağının dəyişmə fluktoqramı göstərilmişdir. Momentin 8000 radiana atılma zamanı, eyni zamanda $k_{us} = k_{fs}$ sıçrayışlı $k_{us} = k_{fs} = 0,9$ qiymətinə qədər tənzimlənilir (yəni $k_{us} = k_{fs} = 1$ bir başlanğıc qiymətinə $\Delta k_{us} = \Delta k_{fs} = -0,1$ əlavə olunur), hərəkət 8000

radiandan 8150 radianadək (yəni $\Delta\tau = 150$ radian) davam edir. Bundan sonra, Pontryaginın prinsipinə uyğun olaraq, $\Delta k_{us} = \Delta k_{fs}$ işarələrini dəyişdirir və $\Delta k_{us} = \Delta k_{fs} = +0,1$ -ə bərabər olur (yəni $k_{us} = k_{fs}$ $k_{us} = k_{fs} = 1,1$ -ə bərabər olur). Hərəkət 8150 radiandan 8450 radiana qədər davam edir, bundan sonra başlanğıc rejimi $k_{us} = k_{fs} = 1$ bərpa olunur. 8450 radiandan 15000 radiana qədər generator yüksüz işləyir ($m_{em} = 0$). 15000 radianda yük sıçrayışı rejimi sıfırdan $m_h = -0,8$ -ə qədər modelləşdirilir. Əlavə olaraq, tənzimləyici qoşulur və müddəti 150 radian olan qiymət əks etdirilir, yəni 15000 radiandan 15150 radianadək və $\tau = 15150$ radiandan $\tau = 15450$ radianadək $k_{us} = k_{fs}$ sıçrayışlı $k_{us} = k_{fs} = 0,9$ (yəni $\Delta k_{us} = \Delta k_{fs} = -0,1$) qiymətlərdə qərarlaşır. Bundan sonra, 15450 radiandan başlayaraq $k_{us} = k_{fs} = 1$ qiyməti bərpa olunur.

Şəkil 6, c-dan göründüyü kimi, Pontryaginın maksimum prinsipi əsasında həyata keçirilən optimal idarəetmə zamanı, rəqsli keçid prosesi praktiki olaraq aperiodik prosesə (bucağın maksimal çıxışı qərarlaşmış bucağın yalnız 5% -nə bərabər olan) çevrilir.

Tezlik çeviricidən qidalanan külək elektrik qurğularının sinxron generatorunun stator dövrəsində gərginliyin yüksək harmonikalarının modelləşdirilməsi üçün metodika işlənib hazırlanmışdır²⁴. Metodikanın mahiyyəti yüksək harmonik təşkilediciləri nəzərə alınaraq statorun gərginliyinin təşkiledicilərini aşağıdakı formada təsvir etməkdir:

$$\left. \begin{aligned} U_{ds} &= A_{11} \cdot (\cos\alpha - \sin\alpha) - A_{12} \cdot (\cos\alpha + \sin\alpha) \\ U_{qs} &= A_{11} \cdot (\cos\alpha + \sin\alpha) + A_{12} \cdot (\cos\alpha - \sin\alpha) \\ A_{11} &= 0,707 \cdot k_{us} (0,9 \cdot \cos(k_{fs} \cdot \tau) - 0,035 \cdot \cos(8 \cdot k_{fs} \cdot \tau) + 0,15 \cdot \cos(10 \cdot k_{fs} \cdot \tau) - \\ &\quad - 0,125 \cdot \cos(11 \cdot k_{fs} \cdot \tau) + 0,125 \cdot \cos(13 \cdot k_{fs} \cdot \tau) - 0,15 \cdot \cos(14 \cdot k_{fs} \cdot \tau) + \\ &\quad + 0,035 \cdot \cos(16 \cdot k_{fs} \cdot \tau)) \\ A_{12} &= 0,707 \cdot k_{us} (0,9 \cdot \sin(k_{fs} \cdot \tau) - 0,035 \cdot \sin(8 \cdot k_{fs} \cdot \tau) + 0,15 \cdot \sin(10 \cdot k_{fs} \cdot \tau) - \\ &\quad - 0,125 \cdot \sin(11 \cdot k_{fs} \cdot \tau) + 0,125 \cdot \sin(13 \cdot k_{fs} \cdot \tau) - 0,15 \cdot \sin(14 \cdot k_{fs} \cdot \tau) + \\ &\quad + 0,035 \cdot \sin(16 \cdot k_{fs} \cdot \tau)) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

²⁴ Vargas, U., Ramirez, A. Extended harmonic domain model of a wind turbine generator for harmonic transient analysis // IEEE Trans. Power Del., – 2016. Vol. 31, No. 3, – p. 1360-1368.

Beləliklə, gərginlik əyrisinin (18) ifadələrində 8-ci, 10-cu, 11-ci, 13-cü, 14-cü və 16-cı harmonik təşkilediciləri nəzərə alınır. Göstrərilən metodika harmonikaların hər birinin generatorun rejim parametrlərinə təsirini analiz etməyə və lazım olduqda süzgəcin parametrlərini dəqiqləşdirməyə etməyə imkan verir.

Fəslin sonunda "külək – külək turbini – külək elektrik qurğularının elektromexaniki çeviricisi (sinxron generator) – elektrik şəbəkəsi" sisteminin imitasiya riyazi modeli təklif olunur. Riyazi model tədqiq olunan region üçün səciyyəvi olan külək sürətlərinin real qiymətlərindən asılı olaraq, külək elektrik qurğularının xüsusi iş rejimlərini təsvir etməyə imkan verir: külək sürətlərinin dəyişmə diapazonundan hər biri üçün külək mühərrikinin fırlanma momentinin xüsusiyyətlərini və külək elektrik qurğularının elektromexaniki çeviricilərinin vəziyyətinin riyazi modelini (bu halda sabit maqnitli sinxron generatorun).

Üçüncü fəsildə elektrik şəbəkəsinə işləyən külək elektrik qurğularının iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınlarının^{25,26} rejim parametrlərinin modelləşdirilməsi və tənzimlənməsi məsələləri nəzərdən keçirilir. İki tərəfdən qidalanan tezliyə görə idarə olunan maşınların tənlikləri tezliyə görə idarə olunan dəyişən cərəyan elektrik maşınlarının işlənilib hazırlanmış universal strukturu nəzərə alınmaqla verilmişdir. Qeyd etmək lazımdır ki, bu tənliklər, lazım olduqda, bu maşınların həm rotor tərəfindən, həm də stator tərəfindən tezliyin tənzimlənməsini həyata keçirməyə imkan verir. Bununla belə, təqdim olunan tənliklər rotor sürəti ω_r ilə fırlanan d, q oxlarında yazılır, yəni sinxron maşınlar üçün Park – Qoryev tənlikləri şəklində yazılmışdır. Bu səbəbdən, sinxron maşınlarla analoji olaraq, stator dövrələrində sürüşmə EHQ-nə və transformator EHQ-nə, habelə iki tərəfdən

²⁵ Amine, B. B. M. E., Ahmed, A., Houari, M.B., Mouloud, D. Modeling, simulation and control of a doubly fed induction generator for wind energy conversion systems // International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), – 2020, Vol.11, No.3, – p. 1197–1210.

²⁶ Соколов, А. И., Климов, Ю. П. Алгоритмы управления асинхронными машинами двойного питания в ветроустановках // – Москва: Научный центр "Энергия и технологии", – 2021. – 205 с.

qidalanan asinxron maşınların stator dolağının aktiv müqavimətini nəzərə almayaraq, iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınların tənliklərini sadələşdirmək və təbii olaraq, qəbul edilmiş fərziyyələri qiymətləndirmək məqsədəuyğundur. Trivial çevrilmələrdən sonra iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınların sadələşdirilmiş tənlikləri aşağıdakı formada təqdim olunacaqdır:

$$\left. \begin{aligned} p\Psi_{dr} &= U_{dr} - r_r(k_r \cdot \Psi_{dr} + k_m \cdot U_s \cdot \cos\theta) \\ p\Psi_{qr} &= U_{qr} - r_r(k_r \cdot \Psi_{qr} + k_m \cdot U_s \cdot \sin\theta) \\ p_s &= \frac{1}{T_j} \cdot m_{kq} - \frac{1}{T_j} k_m \cdot U_s (\Psi_{dr} \cdot \sin\theta - \Psi_{qr} \cdot \cos\theta) \\ p\theta &= s \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

burada $k_r = \frac{x_s}{x_s \cdot x_r - x_m^2}$; $k_m = \frac{x_m}{x_s \cdot x_r - x_m^2}$; $U_{dr} = -U_s \cdot k_{ur} \cdot \sin(k_{fr} \cdot \tau)$;

$$U_{qr} = U_s \cdot k_{ur} \cdot \cos(k_{fr} \cdot \tau).$$

Beləliklə, sadələşdirmə və çevrilmələr nəticəsində 6-cı tərtibə malik olan tam tənliklər sistemi 4-cü tərtib tənliklərə gətirilir.

Bu sadələşdirmələrdən əmələ gələn xətlər qiymətləndirilərkən rejim parametrlərinin qərarlaşmış qiymətlərinin 0-7% diapazonunda fərqləndiyi aşkar olunmuşdur, bu da mühəndisi hesablamaları üçün tamamilə məqbuldur. Birinci yırğalanmada maşınların idarəetmə koordinatlarının (k_{us} və k_{fs}) sıçrayışlı dəyişməsi zamanı rejim parametrlərinin dinamik təşkilediciləri amplituda görə bir-birindən əhəmiyyətli dərəcədə fərqlənə bilər, lakin keçid prosesinin vaxtı və yırğalanmaların sayı praktiki olaraq üst-üstə düşür. Xarici həyəcanlanma təsirlərinin sıçrayışlı dəyişməsi zamanı bu təşkiledicilər amplitud və yırğalanmaların sayına görə bir-birindən az fərqlənir.

İki tərəfdən qidalanan asinxron maşınları olan külək elektrik qurğularının elektrik şəbəkəsinə qoşulma yerindəki şəbəkə gərginliyinin təsiri öyrənilərkən məlum oldu ki, şəbəkə gərginliyinin qiyməti külək elektrik qurğularının²⁷ nominal yük altında $U_s \leq 0,85$ -ə

²⁷ Ибрагим, А. и др. Влияние резкого снижения напряжения на асинхронную машину двойного питания в системе генерации ветроэнергетической

qədər enəndə, dayanıqlığını saxlamaq üçün külək mühərrikinin pərlərinin fırlanma bucağının tənzimlənməsi vasitəsilə külək mühərrikinin fırlanma momentinin qiymətini azaltmaq lazımdır. Külək elektrik qurğularının az yüklənməsi zamanı dayanıqlığını iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınının rotor dolağını qidalandıran gərginliyin amplitudunun yalnız 5% artırılması istiqamətində digər tənzimləmə yolu ilə saxlamaq olar (məsələn, $k_{ur}=0,22$ -dən $k_{ur}=0,23$ -ə qədər).

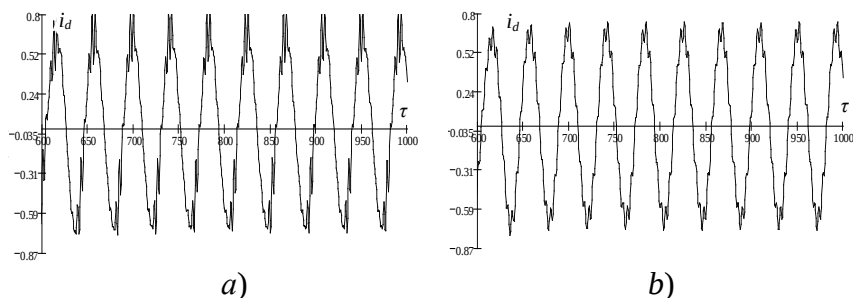
Aşağıda külək elektrik qurğularında iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınların tezlik çeviricisinin gərginliyin yüksək harmonikaların təsirini öyrənmək üçün metodika təqdim edilir. Külək elektrik qurğuları üçün tezlik çeviricilər güc IGBT – tranzistorlar və ya tam idarə olunan GTO – eninə impuls modulyasiyalı tiristorlar əsasında hazırlanır. Aktiv-induktiv yüklə işləyərkən sinusoidal eninə impuls modulyasiya ilə invertorun çıxış gərginliyinin harmonik tərkibi çıxış gərginliyinin harmonik təşkilədicələrinin amplitudlarının müxtəlif harmonikalar üçün modulyasiya əmsalından asılılığıdır (daşıyıcı tezliyin modulyasiya tezliyinə nisbətinin müəyyən qiymətlərində)²⁸. İkiqütblü modulyasiya və $\varepsilon=12$ -ə bərabər olan daşıyıcı tezliyin modulyasiya tezliyinə nisbəti üçün çıxış gərginliyin əyrisində 8-ci, 10-cu, 11-ci, 13-cü, 14-cü və 16-cı harmonikalar olacaqdır. Yəni, rotor dövrələrindəki gərginliklər belə görünəcəkdir:

$$\left. \begin{aligned} U'_{dr} &= -U_s \cdot k_{ur} (0,9 \cdot \sin(k_{fr} \cdot \tau) - 0,035 \cdot \sin(8 \cdot k_{fr} \cdot \tau) + 0,15 \cdot \sin(10 \cdot k_{fr} \cdot \tau) - \\ &\quad - 0,125 \cdot \sin(11 \cdot k_{fr} \cdot \tau) + 0,125 \cdot \sin(13 \cdot k_{fr} \cdot \tau) - 0,15 \cdot \sin(14 \cdot k_{fr} \cdot \tau) + \\ &\quad + 0,035 \cdot \sin(16 \cdot k_{fr} \cdot \tau)) \\ \\ U'_{qr} &= U_s \cdot k_{ur} (0,9 \cdot \cos(k_{fr} \cdot \tau) - 0,035 \cdot \cos(8 \cdot k_{fr} \cdot \tau) + 0,15 \cdot \cos(10 \cdot k_{fr} \cdot \tau) - \\ &\quad - 0,125 \cdot \cos(11 \cdot k_{fr} \cdot \tau) + 0,125 \cdot \cos(13 \cdot k_{fr} \cdot \tau) - 0,15 \cdot \cos(14 \cdot k_{fr} \cdot \tau) + \\ &\quad + 0,035 \cdot \cos(16 \cdot k_{fr} \cdot \tau)) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

установки // Известия НТЦ Единой Энергетической Системы. –2019. 1(80), – с. 122-131.

²⁸ Garcia, H., Segundo, J., Rodriguez-Hernandez, et al. Harmonic modelling of the wind turbine induction generator for dynamic analysis of power quality // Energies, – 2018, Vol. 11, No. 1, – p. 104.

Şəkil 7-də bütün harmonik təşkiledicilərin modelləşdirilməsi nəzərə alınmaqla (Şəkil 7, *a*) və 11-dən başlayaraq yüksək harmonikaların filtrasıyası zamanı (Şəkil 7, *b*) külək elektrik qurğularının iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınlarının müvafiq i_d stator cərəyanının dəyişmə fluktoqramları göstərilmişdir. Əyrilərin müqayisəsindən görüldüyü kimi, filtrasıyadan sonra cərəyanın forması bir qədər sinusoidal formasına yaxınlaşır.



Şəkil 7. 11-dən başlayaraq yüksək harmonikaların filtrasıyasından sonra (*b*) bütün harmonik təşkilediciləri (*a*) nəzərə alaraq iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınların i_d stator cərəyanının dəyişmə fluktoqramları

Növbəti fəsilə statorun cərəyanının tezliyinin funksiyası kimi qısa qapanmış rotorlu asinxron maşının sıxaclarındakı gərginliyin müxtəlif dəyişmə qanunlarının müqayisəli analizi aparılmışdır, onlar ilə aşağıdakılar təmin edilir: maşının özündə aktiv güc itkilərinin minimumu; onun ifratyüklənmə qabiliyyətinin dayanıqlığının saxlanması (M.P. Kostenko qanunu)^{29,30,31} və maşındakı maqnit selinin qiymətinin dəyişməz olaraq saxlanması.

²⁹ Костенко, М.П. Электрические машины, специальная часть // – Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, – 1949. – 712 с.

³⁰ Булгаков, А.А. Частотное управление асинхронными электродвигателями / А.А.Булгаков. – Москва: Наука, – 1966. – с. 216.

³¹ Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями/Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, – 2006, – 94 с.

$$k_{us} = k_{fs} \cdot \sqrt{m_{\Delta B}} \cdot \sqrt[4]{\frac{k_{\Delta}}{(0,61 + 0,39 \cdot k_{fs}) \cdot k_{fs}}}$$

$$k_{us} = k_{fs} \cdot \sqrt{m_{\Delta B}}$$

$$k_{us} = k_{fs}$$

Skalyar idarəetmə zamanı qısa qapanmış rotorlu tezliyə görə idarə olunan asinxron maşınların iş rejimlərinin səmərəliliyini analiz etmək üçün, təklif olunan riyazi modeldə əldə edilmiş hesablama məlumatlarını modeldə nəzərə alınmamış digər güc itkiləri növlərinin analitik hesablama məlumatları ilə birlikdə istifadə etmək məqsəduyğundur.

$$p\Psi_{ds} = U_{ds} - \omega_r \cdot \Psi_{qs} - r_s \cdot i_{ds}$$

$$p\Psi_{qs} = U_{qs} + \omega_r \cdot \Psi_{ds} - r_s \cdot i_{qs}$$

$$p\Psi_{dr} = -r_r \cdot i_{dr}$$

$$p\Psi_{qr} = -r_r \cdot i_{qr}$$

$$Tp\omega_r = m_{kq} - m_{em} \quad (21)$$

$$m_{em} = \Psi_{ds} \cdot i_{qs} - \Psi_{qs} \cdot i_{ds}$$

$$U_{ds} = 0,707 \cdot k_{us} \left[\cos(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha) - \sin(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha) \right]$$

$$U_{qs} = 0,707 \cdot k_{us} \left[\cos(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha) + \sin(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha) \right]$$

Maşının statorunun gərginliyinin amplitudunun idarəetmə qanununu seçərkən, asinxron maşının özündə güc itkisinin minimumunu təmin etməklə yanaşı, mütləq istehlak olunan reaktiv gücün minimumunu da nəzərə almaq lazımdır, çünki bu güc bu maşınlar qoşulduğu şəbəkələrdəki əlavə enerji itkilərini müəyyənləşdirir.

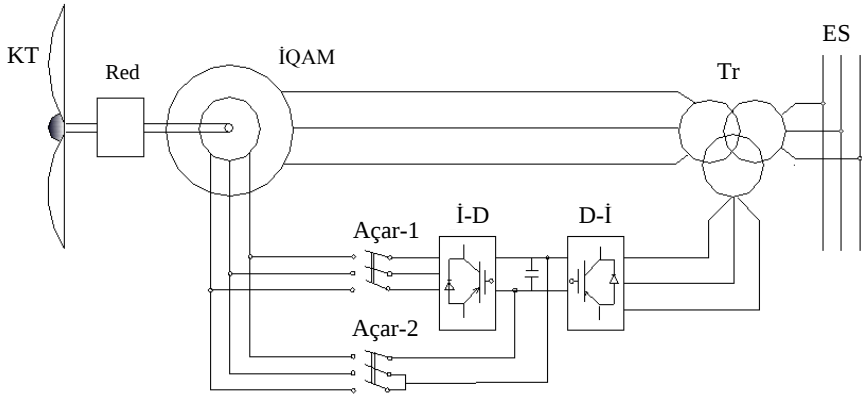
Yuxarıda göstərilən meyarlara əsasən, iki idarəetmə qanununun tətbiqi daha məqsəduyğundur – ifratyüklənmə qabiliyyətinin sabitliyi üzrə tənzimləmə və maqnit selinin sabitliyi üzrə tənzimləmə. İcra etməsinin sadəliyinə görə son idarəetmə qanunu üstünlük təşkil edir, lakin momentin dəyişməsinin ventilyator xarakterinə görə, $k_{us} = k_n' \cdot k_{fs} \cdot \omega_r$ ifadə ilə müəyyən edilən ifratyüklənmə qabiliyyətinin sabitliyi üzrə idarəetmə qanunu daha effektiv olur.

Qısa qapanmış rotorlu asinxron generatorların və iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınları olan asinxron generatorların işlənilib hazırlanmış üç koordinatlı riyazi modellərinə əsasən, onların tezliyə görə işəsalma rejimlərinin tədqiqi və müqayisəli analizi aparılmışdır. Bu məsələ külək elektrik qurğularının və bir neçə külək elektrik qurğularından ibarət olan külək parklarının qidalanma mərkəzlərindən kifayət qədər uzaq və reaktiv güclərlə zəif kompensasiya edilmiş şəbəkələrə qoşulduğu hallarda xüsusilə aktualdır. Bu hallarda, külək elektrik qurğularının asinxron generatorlara qoşulma rejimləri işəsalma dövrü ərzində gərginliyin əhəmiyyətli dərəcədə azalmasına səbəb ola bilər. Tədqiqatlar göstərdi ki, işəsalınma dövründə elektrik şəbəkələrinə təsiri nöqtəyi-nəzərindən, külək elektrik qurğularının tezliyə görə idarə olunan qısa qapanmış rotorlu asinxron generatorları daha üstünlüklər. Tezliyə görə işəsalma zamanı işəsalma cərəyanı külək elektrik qurğularının iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınlarının işəsalma cərəyanından 2 dəfə azdır və vacib olan odur ki, işəsalma prosesinə sərf olunan enerji də 55% aşağıdır, çünki asinxron generatorlu külək elektrik qurğularının ümumi işəsalma vaxtı tədqiq olunan nümunə üçün təxminən 400 radiandır və iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınları olan külək elektrik qurğuları üçün – təxminən 600 radiandır.

Külək elektrik qurğularında iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınları istifadə edildikdə, külək sürətlərinin dəyişmə diapazonu çox əhəmiyyətsiz (praktiki olaraq sabit) olduğu halda, yəni külək elektrik qurğularının fırlanma tezliyini tənzimləməyə ehtiyac olmadıqda, onun sinxron iş rejiminə keçirilməsi təklif olunur³². Bunun üçün, iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınların rotor dolağı müvafiq qoşulmalardan sonra sabit cərəyan mənbəyinə qoşulmalıdır, bunun üçün tezlik çeviricisini (invertorun) çıxışından açmaq və düzləndiricinin çıxışına qoşmaq kifayətdir, Şəkil 8-də göstərildiyi kimi. Bu sxemin orijinallığı ondan ibarətdir ki, rotor dolağı tezlik

³² Ferre, A. J., Bellmuntriol, G., Sumper, A. Modeling and control of the doubly fed induction generator wind turbine // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2010. Vol. 18, Issue 9, – p. 1365-1381.

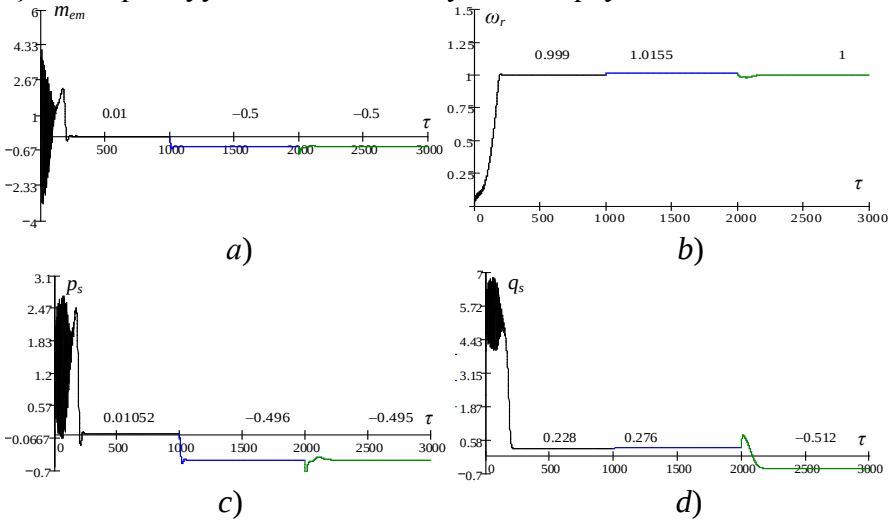
çeviricisinin dəyişən cərəyan bəndindən qidalanır. Əlavə olaraq, rotor dolağının iki fazası bir-birinə paralel olaraq və üçüncü faza ilə ardıcıl olaraq birləşmişdir.



Şəkil 8. Rotor dövrəsindəki tezlik çeviricisi ilə iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınların sinxron iş rejiminə keçirilməsi üçün elektrik sxemi

Şəkil 9-da iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınların sinxron iş rejiminə keçirildiyi zaman parametrlərinin dəyişmə fluktoqramları göstərilmişdir. 0 – 1000 radian vaxt diapazonunda qısa qapanmış rotor dolaqları ilə iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınların birbaşa işəsalması həyata keçirilir, bu halda fırlanma momenti sıfırdır (Şəkil 9, a), rotorun fırlanma tezliyi $\omega_r=0,999$ (Şəkil 9, b), statorun aktiv gücü də praktiki olaraq sıfıra bərabərdir $p_s=0,01$ (Şəkil 9, c) və reaktiv güc $q_s=0,228$ -ə bərabərdir (plyus işarəsi onun elektrik şəbəkəsindən istehlak edildiyini göstərir) (Şəkil 9, d). 1000–2000 radian vaxt diapazonunda külək meydana gəlir, hansı ki, külək elektrik gurgullarının valında $m_h=-0,5$ -ə bərabər hərəkətverici moment yaradır, maşın generator rejiminə keçir, fırlanma momenti $\omega_r=1,015$ -ə bərabər olur (Şəkil 9, b), aktiv və reaktiv güclərin qiymətləri müvafiq olaraq, $p_s=-0,496$ (aktiv güc şəbəkəyə verilir) (Şəkil 9, c) və $q_s=0,276$ (reaktiv güc şəbəkədən istehlak olunur (Şəkil 9, d)) bərabər olur. 2000 radiandan iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınlar sinxron iş rejiminə

keçir, bu rejimdə reaktiv güc $q_s=0,276$ -dan $q_s=-0,512$ -ə dəyişir (şəbəkəyə verilir). Bu halda, iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınların rotor dolağındakı sabit cərəyan $i_f=-0,889$ və rotorun gərginliyi $U_f=-0,04$ -ə bərabər olur. Beləliklə, modelləşdirmə nəticələri külək elektrik qurğularının iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınların sinxron iş rejiminə keçirilməsi üzrə təklif olunan metodun işləmək qabiliyyətini və səmərəliliyini təsdiqləyir.



Şəkil 9. Külək elektrik qurğularının iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınlarının sinxron iş rejiminə keçirildikdə iş parametrlərinin dəyişmə fluktoqramları

Bu fəsilin sonunda iki tərəfdən qidalanan asinxron generatorlu külək elektrik qurğularının işləməsi zamanı külək mühərrikinin pərlərinin dönmə bucağını tənzimləyən sistemin riyazi modeli təqdim edilmişdir³³. Məlumdur ki, külək mühərrikinin pərlərinin dönmə bucağının idarəetməsi külək sürətlərinin dəyişmə zonasında V_{hes} hesablanmış qiymətindən (bu halda külək elektrik qurğularına nominal güc verilir) V_{max} maksimum iş külək sürətinə qədər (bundan

³³ Smida, B. M., Sakly, A. Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines. - Journal of Renewable Energy and Sustainable Development (RESDD), – 2015. Vol. 1, No. 1, – p. 81-88.

sonra külək elektrik qurğusu yelqovan vəziyyətə keçir və dayanır) həyata keçirilir³⁴.

Təklif olunan metodikanın mahiyyəti ondan ibarətdir ki, külək elektrik qurğularının müəyyən tiplərinin kataloq məlumatlarından istifadə edərək, yəni yuxarıda göstərilən külək sürətlərinin dəyişmə diapazonunda külək sürətinin funksiyasında C_p külək enerjisindən istifadə əmsalının dəyişməsi (azalması), külək mühərrikinin fırlanma momentinin onun pərlərinin dönmə bucağının funksiyasından asılılığını sintez etmək mümkündür. $P_{nom}=2500$ kW gücündə olan müəyyən Nordex N80 tipli³⁵ külək elektrik qurğusunun nümunəsində, külək mühərrikinin generator valına gətirilmiş fırlanma momenti üçün ifadə aşağıdakı şəkildə yazılır:

$$m_{KEQ} = V^3 [A \cdot \beta^2 + B \cdot \beta + C] \quad (22)$$

$$\text{burada } A = \frac{a_2 \cdot k_\beta^2}{C_{pn} \cdot V_{расч}^3}; \quad B = \frac{a_1 \cdot k_\beta}{C_{pn} \cdot V_{расч}^3} + \frac{2 \cdot a_2 \cdot k_\beta}{C_{pn} \cdot V_{расч}^2};$$

$$C = \frac{a_0}{C_{pn} \cdot V_{расч}^3} + \frac{a_1}{C_{pn} \cdot V_{расч}^2} + \frac{a_2}{C_{pn} \cdot V_{расч}}; \quad V - \text{cari külək sürəti}; a_0, a_1, a_2 -$$

ikinci dərəcəli polinomu C_p ilə ifadəsinin aproksimasiya əmsalları, C_{pn} – nominal gücün verildiyi külək enerjisindən istifadə əmsalının qiyməti, V_{hes} – külək elektrik qurğusunun nominal gücünün verildiyi hesablanmış külək sürəti [m/s], k_β – pərlərin dönmə bucağı β ilə külək sürəti arasındakı mütənasiblik əmsalı. Nordex N80 tipli külək elektrik qurğusu üçün bu əmsallar $A=2,58 \cdot 10^{-8}$; $B=-0,44 \cdot 10^{-5}$; $C=-0,265 \cdot 10^{-4}$ bərabərdir.

(22) tənliyinin "işləmə" alqoritmi aşağıdakıdır: $V_{hes} \div V_{max}$ diapazonunda yerləşən külək sürəti hər hansı V_1 qiymətinə çatdıqda (külək mühərrikinin pərlərinin dönmə bucağının bütün tənzimləmə traktının müvafiq vaxt sabiti ilə), β_1 üçün (22) tənliyini $m_h=1$ -ə çevirən

³⁴ Цгоев, Р. С. Повышение эффективности ветроэнергетического агрегата регулированием угла установки лопастей ветроколеса/ Р.С. Цгоев, Г.А. Яковенко// Электричество. – 2014. – № 3. – с. 25-30.

³⁵ Nordex Company. Products & Servic. [Electronic resource] / URL: <https://www.nordex-online.com/en/product/product-main-page>

qiymət müəyyən edilir, yəni tənzimləyicinin hərəkətindən sonra, külək elektrik qurğularının hərəkətverici momentinin qərarlaşmış qiyməti nominal qiymətə bərabər olaraq sabit qalır. İki tərəfdən qidalanan asinxron maşın ilə Nordex N80 tipli külək elektrik qurğusunun pərlərinin dönmə bucağının tənzimləmə sistemi iki idarəetmə prinsipinə əsaslanan – "həyəcanlanma üzrə" idarəetmə və "kənara çıxma üzrə" idarəetmə – avtomatik idarəetmə sistemi olan riyazi model üzərində tədqiq edilmişdir. Külək sürəti həyəcanlanma təsiri kimi qəbul edilir və ikinci idarəetmə iki tərəfdən qidalanan asinxron maşının aktiv gücünün nominal qiymətdən kənara çıxması üzrə tənzimləməyə əsaslanır. Hesablama nəticələrinin müqayisəli analizi göstərdi ki, digər bərabər şəraitlərdə "kənara çıxma üzrə" idarəetmə prinsipini həyata keçirərkən (3–4% statizm ilə) keçid prosesinin müddəti "həyəcanlanma üzrə" idarəetmə prinsipini həyata keçirərkən keçid prosesinin müddətindən on dəfə azdır.

Bundan əlavə, külək elektrik stansiyalarının qurğularında reaktiv gücün kompensasiyası məsələləri öyrənilmişdir³⁶. Müəyyən edilmişdir ki, asinxron generatorlarda enerji sisteminə qoşulduqda reaktiv gücün maksimum miqdarı sərf olunur. Bu qurğuların asinxron generatorlarında reaktiv enerji istehlakının azaldılması yolları göstərilmişdir.

Külək elektrik stansiyalarının asinxron generatorlarının işə salınması və istismarı zamanı reaktiv gücün çoxsaylı tədqiqatları elektrik şəbəkəsinin tələblərindən asılı olaraq reaktiv gücün kompensasiyasının tələb olunan dəyərlərini hesablamağa imkan verir, yəni. kompensasiya edilmiş kondansatörlərin növünü və parametrlərini seçin.

Dördüncü fəsilə iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınları olan külək elektrik qurğularının sonsuz güc şəbəkəsinə işləmə

³⁶ Apata, O., Oyedokun, D. Novel reactive power compensation technique for fixed speed wind turbine generators // Proc. of the IEEE PES/IAS Power Africa, – 2018, – p. 628-633.

rejimlərinin^{37,38} (xarici şəbəkənin parametrləri nəzərə alınmaqla) modelləşdirmə məsələləri tədqiq olunur. Modelləşdirmə metodu bu fakta əsaslanır ki, generator sıxaclarından $\dot{U}_g$ sonsuz güc şinlərinə $\dot{U}_\varnothing$ qədər xarici şəbəkənin tənlikləri elə fərziyyəsi ilə yazılır ki, q_0 oxunun həqiqi ədədlərin oxu ilə üst-üstə düşməsi şərti ilə kompleks müstəvinin oxları sabit bucaq sinxron sürəti ω_s ilə fırlanan d_0 , q_0 oxları ilə üst-üstə düşürlər. Bundan sonra, xarici şəbəkənin d_0 , q_0 oxları üzrə ayırmış bu tənliklər birlikdə həll olunur. Sonra d_0 və q_0 oxlarında yazılmış gərginliyin və cərəyanın təşkilediciləri iki tərəfdən qidalanan asinxron maşının d , q oxlarında yazılmış təşkiledicilərə köçürülür. Beləliklə, iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınların U_d , U_q gərginliklərinin və i_d , i_q cərəyanlarının təşkilediciləri sintezləşdirilir. Şəkil 10 (a, b)-da sistemin elektrik sxemi və onun əvəzetmə sxemi göstərilmişdir. $\dot{U}_g$, $\dot{U}_\varnothing$, $\dot{U}_d$ – müvafiq olaraq generatorun çıxışında (iki tərəfdən qidalanan asinxron maşını), yük düyünündə və qəbuledici sistemin şinlərində kompleks formadakı gərginliklərdir. Müvafiq əvəzetmələr və çevirmələrdən sonra ω_r maşının rotorunun sürətində fırlanan U_{rd} , U_{rq} oxlarda təmsil olunan generatorun gərginliyinin təşkilediciləri üçün aşağıdakı ifadələr əldə edirik:

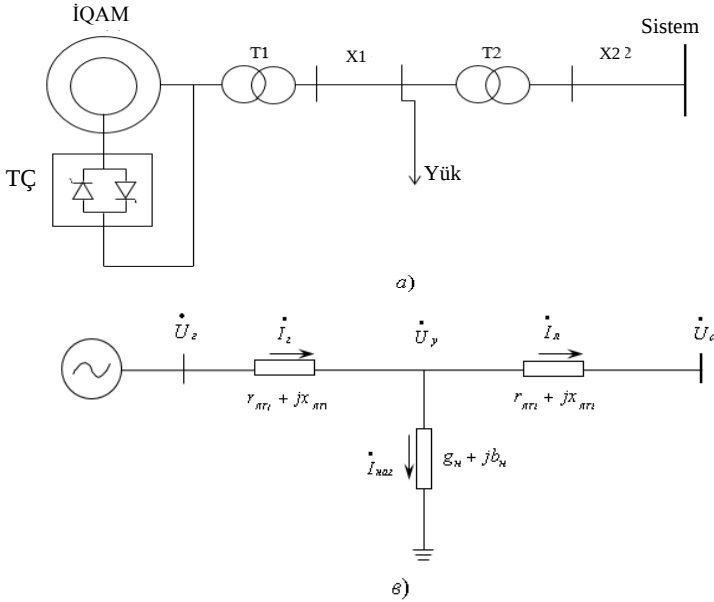
$$\left. \begin{aligned} U_{rq} &= (k_1 \cdot U_{cd_0} - k_2 \cdot U_{cq_0}) \cdot \sin \theta + (k_1 \cdot U_{cq_0} + k_2 \cdot U_{cd_0}) \cdot \cos \theta + k_3 \cdot i_{zq} - k_4 \cdot i_{rd} \\ U_{rd} &= (k_1 \cdot U_{cd_0} - k_2 \cdot U_{cq_0}) \cdot \cos \theta + (k_1 \cdot U_{cq_0} + k_2 \cdot U_{cd_0}) \cdot \sin \theta + k_4 \cdot i_{zq} - k_3 \cdot i_{rd} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

burada U_{cd_0} , U_{cq_0} – d_0 , q_0 sinxron olaraq fırlanan oxlarda qəbuledici sistemin gərginliyinin təşkilediciləri; i_{rd} , i_{rq} – $i_{rd} = i_{ds} + k_{ur} \cdot i_{dr}$ və $i_{rq} = i_{qs} + k_{ur} \cdot i_{qr}$ ifadələrini nəzərə alaraq, generatorun çıxışındakı d , q oxlarında generatorun (iki tərəfdən qidalanan asinxron maşın) cərəyanlarının təşkilediciləri; k_1 , k_2 , k_3 , k_4 – T1 və T2 transformatorlarının, X1 və X2 xətlərinin, həmçinin yükün aktiv və

³⁷ Сидоров, Л. П., Орлов, В. С. Анализ электромеханических процессов в АМДП при подключении к энергосетям // Энергия будущего, – 2022. 4(23), – с. 28-36.

³⁸ Jiao, J., Yu, Y., Zou, J. Coordinated Frequency Control of Doubly-fed Induction Generator Based on Interconnected Grid // In Proceedings of the 2020 4th International Conference on Power and Energy Engineering (ICPEE), – Xiamen, China, – 2020, – p. 124-129.

induktiv müqavimətlərindən asılı olan əmsallar, θ – iki tərəfdən qidalanan asinxron maşının yük bucağıdır.



Şəkil 10. İki tərəfdən qidalanan asinxron maşınının əsaslanan generator, T1 və T2 transformatorları, X1 və X2 elektrik xətləri, yük və sonsuz güc qəbuledici şintlər sistemini özündə birləşdirən külək elektrik qurğusunun elektrik ötürülmə sxemi: a) – elektrik sxemi; b) – əvəzetmə sxemi

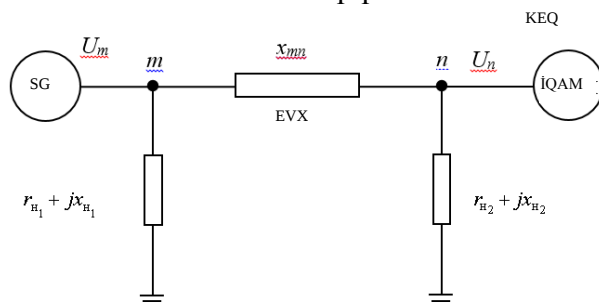
Bunu nəzərə alaraq, gərginliklər balansısı tənliklərinə əsaslanaraq iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınının tənlikləri aşağıdakı formada yazılacaqdır:

$$\left. \begin{aligned} p\Psi_{sd} &= U_{rd} - \omega_r \cdot \psi_{qs} - r_s \cdot i_{sd} \\ p\Psi_{sq} &= U_{rq} + \omega_r \cdot \psi_{ds} - r_s \cdot i_{sq} \\ p\psi_{rd} &= -U_r \cdot k_{ur} \cdot \sin(k_{fr} \cdot \tau) - r_r \cdot i_{rd} \\ p\psi_{rq} &= \pm U_r \cdot k_{ur} \cdot \cos(k_{fr} \cdot \tau) - r_r \cdot i_{rq} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

burada $U_r = \sqrt{U_{rd}^2 + U_{rq}^2}$.

Yuxarıda təsvir olunan sistemin modelləşdirilməsinin nəticələrinə əsasən, iki tərəfdən qidalanan asinxron maşın əsasında hazırlanmış külək elektrik qurğularının generatorunun iş rejimləri müəyyən edilir, belə rejimlərdə həm külək elektrik qurğularının iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınlarından, həm də enerji sistemindən yerli yükə axan aktiv və reaktiv güclərin (cərəyanların) qiymətləri və istiqamətləri dəyişir. Bu vəziyyəti xüsusilə sistemin tədqiq olunan düyünündə aktiv və reaktiv güclərin istehlakı, verilməsi və idarəetməsi rejimlərini hesablayarkən bilmək lazımdır, çünki külək elektrik qurğularının verdiyi enerji külək sürətlərinin qiymətlərindən asılı olan dəyişən qiymətdir.

Külək elektrik qurğularının yerli məhdud güclü dəyişən cərəyan sistemində işləməsi maraq kəsb edir, məsələn, enerji sistemi ilə elektrik əlaqəsi olmadığı bölgələrdə dizel-elektrik və ya qaz turbin qurğuları ilə birlikdə³⁹. Bu cür sistemlərin iş rejimlərini Şəkil 11-də göstərilən elektrik sxemi əsasında tədqiq etmək olar.



Şəkil 11. İki tərəfdən qidalanan asinxron maşını ilə külək elektrik qurğusunun məhdud güc sistemində qoşulma diaqramı

Burada dizel-elektrik qurğusunun sinxron generatoru (SG) m düyününə qoşulub, ondan $r_{n1} + jx_{n1}$ yükü və m və n düyünlərini birləşdirilən induktiv müqavimət x_{mn} olan elektrik veriliş xətti (EVX) qidalanırlar (analizin asanlılığı üçün aktiv müqavimət nəzərə alınmır). Külək elektrik qurğusunun iki tərəfdən qidalanan asinxron generatoru

³⁹ Arnaltes, S., Rodriguez-Amenedo, J.L., Montilla-DJesus, M.E. Control of variable speed wind turbines with doubly fed asynchronous generators for stand-alone applications // Energies, – 2018, Vol. 11, – p. 26-32.

(İQAM) və $r_{n2}+jx_{n2}$ yükü n düyününə qoşulub. Düyün gərginlikləri müvafiq olaraq U_m və U_n bərabərdir.

Həll üçün düyün nöqtələrində aktiv və reaktiv güclər balans metodu istifadə olunur. Bu metodda hər elektrik maşınının tənlikləri hər hansı koordinat sistemində təsvir edilə bilər, çünki yalnız aktiv və reaktiv güclərin qiymətlərindən (skalyar kəmiyyətlər olan) istifadə edilir. Bu halda, maşınların hər biri üçün güclər qoşulduğu düyündə olan gərginlikdən istifadə edərək müəyyən edilir.

m və n düyünləri arasındakı elektrik ötürücü xəttinin tənliyinin həlli aşağıdakı nisbətlərdən müəyyən edilir:

$$\left. \begin{aligned} P_m &= \frac{U_m \cdot U_n}{x_{mn}} \sin \theta_{mn} \\ Q_m &= \frac{U_m^2}{x_{mn}} - \frac{U_m \cdot U_n}{x_{mn}} \cos \theta_{mn} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Bununla belə, m və n düyünləri üçün aşağıdakı şərtlər yerinə yetirilməlidir

$$\left. \begin{aligned} P_m &= P_{SG} - P_{n1} \\ Q_m &= Q_{SG} - Q_{n1} \end{aligned} \right\} \quad \text{və} \quad \left. \begin{aligned} P_n &= P_{AGI} - P_{n2} \\ Q_n &= Q_{SG} - Q_{n2} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Beləliklə, sxemin əvvəlinə daxil olan P_m və Q_m aktiv və reaktiv güclər, eləcə də sxemin əvvəlindəki gərginlik U_m məlum kəmiyyətlər sayılır və müəyyən edilməsi lazım olan məchul kəmiyyətlər gərginlik, aktiv və reaktiv güclər və sxemin sonundakı gərginlik vektorlarının sürüşmə bucağı θ_{mn} -dir.

Trivial çevrilmələrdən sonra aşağıdakılar müəyyən olunur:

$$\left. \begin{aligned} \theta_{mn} &= \arctg \frac{P_m \cdot x_{mn}}{U_m^2 - Q_m \cdot x_{mn}} \\ U_n &= \sqrt{\frac{P_m^2 \cdot x_{mn}^2 + (U_m^2 - Q_m \cdot x_{mn})^2}{U_m^2}} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

(27) tənliyindən görünür ki, U_m , P_m və Q_m qiymətlərini təyin edərək θ_{mn} və U_n üçün ifadələri birmənalı şəkildə əldə etmək olar, hansı ki, xəttin hissəsinin sonunda istifadə olunmalıdır – bunlar külək elektrik gurgusunun iki tərəfdən qidalanan asinxron maşını üçün giriş parametrləridir.

Sinxron generatorun və külək elektrik qurğusunun iki tərəfdən qidalanan asinxron generatorunun riyazi modelləri tərtib edilmiş, (27) tənliyi nəzərə alınmaqla onların gücləri müəyyən edilmişdir. Tədqiqat zamanı, külək rejimindən asılı olan yüklərin parametrləri, külək elektrik qurğusunun iki tərəfdən qidalanan asinxron generatorunun gücü dəyişilmişdir, eyni zamanda, yük düyünlərindəki güclərin, gərginliklərin qiymətləri təyin edilmişdir. Külək elektrik qurğusunun iki tərəfdən qidalanan asinxron generatorunun valındakı yük müqavimətlərinin və fırlanma momentinin qiymətlərinin kəskin dəyişməsi zamanı sistemin dinamik rejimləri də tədqiq edilmişdir.

İŞİN ƏSAS NƏTİCƏLƏRİ

1. Külək elektrik qurğularının əsas elektrik maşınlarının riyazi modelinin universal strukturu işlənib hazırlanmışdır; bu struktur bu maşınların bütün mümkün idarəetmə növlərini həyata keçirməyə imkan verir – həm qısa qapanmış rotorlu asinxron maşınlar üçün, həm də sabit maqnitlərdən təsirləndirmə və elektromaqnit təsirləndirməsi olan sinxron maşınlar üçün stator tərəfindən tezliyin tənzimlənməsi, fazalı rotorlu asinxron maşınlar üçün (iki tərəfdən qidalanan asinxron maşını) üçün rotor tərəfindən tezliyin tənzimlənməsi.

2. Külək elektrik qurğularının tezliyə görə idarə olunan qısa qapanmış rotorlu asinxron maşınının fəzada hərəkətsiz olan α_s , β_s , γ_s üç koordinatlı sistemində modelləşdirmə metodu təklif olunur. Stator gərginliyinin təşkiledicilərinə daxil edilmiş düzəlişlər idarəetmə parametrlərindəki dəyişiklərini (maşının faza gərginliklərinin amplitudunu və tezliyini) sadə və effektiv şəkildə nəzərə almağa imkan verir.

Rotor dövrəsində tezlik çeviricisinə malik faza rotorlu, tezliyə görə idarə olunan asinxron maşının yeni üç koordinatlı riyazi modeli işlənib hazırlanmışdır. Bu halda, tənliklər rotor sürəti ilə fırlanan α_s , β_s , γ_s , oxlarında yazılmışdır. Bu həm də maşının idarəetmə parametrlərini (rotor dolağını qidalandıran gərginliyin amplitudunu və tezliyini) nisbətən asanlıqla modelləşdirməyə imkan verir.

3. Külək elektrik qurğularının dəyişən cərəyan elektrik maşınlarının universal riyazi modeli əsasında sabit maqnitli tezliyə

görə idarə olunan sinxron maşının riyazi modeli təklif olunmuşdur. Bu maşının tənliklərində sabit maqnitin həcm vahidinə gətirilmiş maqnit enerjisini əks etdirən parametr tətbiq olunur (qalıq induksiya kiçikdirsə, hesab edə bilərik ki, o sabit maqnitin koersitiv qüvvəsini modelləşdirir).

4. Riyazi model üzərində sabit maqnitli sinxron generatoru olan külək elektrik qurğularının dinamik dayanıqlığını tədqiq edərkən, küləyin ani şiddətinin qiymətindən və onun müddətindən başqa, dinamik dayanıqlığına küləyin ani şiddətindən sonra qərarlaşmış külək sürətinin qiyməti təsir edir – külək sürətinin qiyməti nə qədər aşağı olarsa, dinamik dayanıqlıq o qədər yüksək olur. Maqnit enerjisinin qiymətinin həcm vahidi üzrə artması ilə dinamik dayanıqlığın artması aşkar edilmişdir. Dinamik dayanıqlığın artırılması üçün bir tövsiyə olaraq, küləyin ani şiddəti zamanı generatorun stator dolağında cərəyanın tezliyinin son həddi qiymətinə qədər qısa müddətli azaldılması təklif olunur.

5. İstər generator valından, istərsə də güc sistemindən kəskin həyəcanlanmalar halında, Pontryaginın maksimum prinsipindən istifadə edərək, sabit maqnitli külək elektrik qurğularının sinxron generatorlarının rotorlarının rəqslərinin effektiv dempflənməsi üçün əvvəlcə eyni zamanda generatorun stator gərginliyinin amplitudunu və tezliyini artırmaq (nominalın 10%-i) və müəyyən müddətdən sonra yükün sıçrayışı zamanı onları 10% azaltmaq təklif olunur. Yükün atılması zamanı, bu prosedur tərs qaydada aparılmalıdır (yəni əvvəlcə 10% azaltmaq və sonra eyni miqdarda artırmaq).

6. Sabit maqnitli külək elektrik qurğularının sinxron generatorunun tənliklərinin yazılma forması generatorun stator dolağını qidalandıran gərginliyin ayrılardakı bütün harmonik təşkilədiciləri sadə və effektiv şəkildə əks etdirməyə imkan verir. Bu, harmonikaların hər birinin generatorun rejim parametrlərinə təsirini qiymətləndirməyə və lazım olduqda filtr parametrlərini tətbiq etməyə və düzəltməyə imkan verir.

7. Əvvəllər bizim tərəfimizdən işlənib hazırlanmış külək elektrik qurğularının iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınının riyazi modelinin təkmilləşdirilməsi təklif olunur. Dəqiqləşdirmə iki tərəfdən

qidalanan asinxron maşınların tezliyə görə idarəetməsi zamanı stator və rotor dolaqlarının aktiv və reaktiv güclərinin ayrıca təyin edilməsi üçün tənliklərin çıxarılmasından ibarətdir və maşının ümumi aktiv və reaktiv gücləri cəbri toplama əməli yolu ilə müəyyən edilir. İki tərəfdən qidalanan asinxron maşınların tənliklərinin sadələşdirilməsinin məqbulluğu məsələləri nəzərdən keçirilmişdir. Maşının stator dövrəsindəki transformator EHQ-nin, stator dolaqlarının sürüşmə EHQ-nin və aktiv müqavimətlərinin eyni vaxtda nəzərə alınmaması yolu ilə sadələşdirilməsi zamanı, qərarlaşmış rejimin parametrləri tam tənliklər üzrə hesablanan parametrlərlə müqayisədə 0–7%-ə qədər fərqlənir, bu da kvaziqərarlaşmış və statik rejimlərin tədqiqi üçün belə sadələşdirməni tövsiyə etməyə imkan verir.

8. İki tərəfdən qidalanan asinxron maşınları olan külək elektrik qurğularının elektrik şəbəkəsinə qoşulduğu yerdə şəbəkə gərginliyini dayanıqlığının saxlanması üçün nominal yüklü külək elektrik qurğularının işləmə rejimində $U_s=0,85$ və daha aşağı qiymətə azaltmaq üçün, külək mühərrikinin pərlərinin dönmə bucağını tənzimləyərək külək mühərrikinin fırlanma momentinin qiymətini azaltmaq lazımdır. Külək elektrik qurğularının az yükləməsində (50% və daha aşağı), sistemin dayanıqlığını maşının rotor dolağını (yəni tezlik çeviricisinin çıxışında) qidalandıran gərginliyin amplitudunu 5–7% artırmaqla təmin etmək olar.

9. Skalyar idarəetmədə və maşının özündə minimum enerji itkisinin, həmçinin ifratyüklənmə qabiliyyətinin və maqnit selinin qiymətlərinin sabitliyinin təmin edilməsində, qısa qapanmış rotorlu tezliyə görə idarə olunan asinxron maşının işinin səmərəliliyinin analizi təqdim edilmişdir. Ümumi güc itkilərinin və istehlak olunan reaktiv gücün qiymətləri nəzərə alınaraq, maşının valındakı momentin qiyməti sabit olduqda ifratyüklənmə qabiliyyətinin və maqnit selinin sabitliyinə görə tənzimlənməsinin məqsədəuyğun olduğu aşkar edilmişdir. Enerji itkiləri və istehlak olunan reaktiv gücün məcmusuna görə maşının valındakı momentin dəyişməsinin ventilyator xarakteri ilə, maşının ifratyüklənmə qabiliyyətinin sabitliyi üzrə qanunun tətbiqi daha effektiv olur.

10. Külək elektrik qurğularında tezliyə görə idarə olunan faza rotorlu (iki tərəfdən qidalanan asinxron maşını) və qısa qapanmış rotorlu asinxron generatorun işlənilib hazırlanmış tam üç koordinatlı riyazi modellərinə əsaslanaraq, tezliyə görə işəsalma rejimlərinin müqayisəli analizi aparılmışdır. Külək elektrik qurğularının qoşulduğu yerlərdə elektrik şəbəkələrinə minimum təsir baxımından qısa qapanmış rotorlu tezliyə görə idarə olunan asinxron generatorların istifadəsinin ən məqsəduyğun olduğu aşkar olunmuşdur, çünki onların işəsalma cərəyanı külək elektrik qurğularının iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınlarının işəsalma cərəyanından təxminən 2 dəfə azdır və işəsalma prosesinə sərf olunan enerji də 55% aşağıdır.

11. Külək elektrik qurğularının iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınlarının sinxron iş rejiminə keçirilməsinin yeni üsulu təklif edilmişdir. Məsələn, bu iş rejimi külək qurğularında, onların fırlanma tezliyini tənzimləməyə ehtiyac olmadığı müəyyən uzun müddət ərzində, həyata keçirilə bilər. Bu metodun və müvafiq olaraq işlənilib hazırlanmış riyazi modelin orijinallığı ondan ibarətdir ki, iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınların sinxron rejimə keçirilməsi üçün yalnız iki tərəfdən qidalanan asinxron maşının tezlik çeviricisinin düzləndirici hissəsindən istifadə edilir. Modelləşdirmə nəticələri təklif olunan metodun işləmə qabiliyyətini və effektivliyini təsdiqlədi.

12. Müasir külək elektrik qurğularının külək mühərrikinin pərlərinin dönmə bucağının tənzimləməsini modelləşdirmək üçün metodika işlənilib hazırlanmışdır. Tənliklər sintezləşdirilmiş və tezliyə görə idarə olunan iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınlar ilə təchiz olunmuş külək elektrik qurğularında külək mühərrikinin pərlərinin dönmə bucağını tənzimləyən sistem ilə birlikdə işləyən avtomatlaşdırma sisteminin modelləşdirilməsi həyata keçirilmişdir, nəticədə aşkar olunmuşdur ki, digər bərabər şəraitlərdə, əgər avtomatlaşdırma sistemində “kənara çıxma” üzrə idarəetmə prinsipindən istifadə edilərsə, keçid prosesinin müddəti (statizm 3–4% olduqda) avtomatik idarəetmə sistemində (AİS) “həyəcanlanma” üzrə idarəetmə prinsipi tətbiq olunduqda keçid prosesinin müddətindən on dəfə aşağıdır.

13. Külək elektrik qurğularının yerli yükü və xarici şəbəkənin parametrləri "sonsuz güc" sisteminə qədər nəzərə alınaraq, "sonsuz güc" şəbəkəsində işləyərkən iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınları olan külək elektrik qurğularının modelləşdirilməsi və tədqiqi metodikası təqdim edilmişdir. Təklif olunan metodikanın mahiyyəti, maşının rotorunun sürətində fırlanan oxlarda yazılmış iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınların tənliklərinin və sinxron olaraq fırlanan koordinat sistemində yazılmış xarici şəbəkənin və yükün tənliklərinin "uyğunlaşması"-ndan ibarətdir. Modelləşdirmə nəticələrinə əsasən, həm külək elektrik qurğularının asinxron generatoru tərəfindən, həm də enerji sistemi tərəfindən (sonsuz güc şinləri) yerli yükə axan aktiv və reaktiv güclərin qiymətləri və istiqamətlərinin dəyişdiyi iş rejimləri aşkara çıxarılmışdır. Bunu xüsusilə sistemin tədqiq olunan düyünündə güclərin istehlakı, verilməsi və idarəetməsi rejimlərini hesablayarkən bilmək lazımdır.

14. "Külək elektrik qurğularında iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınları – məhdud güc sinxron generatoru" sisteminin riyazi modeli təklif olunmuşdur, yəni külək elektrik qurğularının iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınlarının məhdud güclü şəbəkə üçün işləməsi. Bu halda, generatorların hər birinin yerli yükü var. Bu model "güc balans" prinsipi əsasında qurulmuşdur və bu səbəbdən generatorların və yüklərin tənliklərinin vahid koordinat sisteminə gətirilməsinə ehtiyac yoxdur. Külək elektrik qurğularının həm sinxron generatorunun, həm də asinxron generatorunun bütün mümkün iş rejimləri həm sinxron generatorun sıxaclarında, həm də külək elektrik qurğularının iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınlarının sıxaclarından gücün götürülməsinin fərqli qiymətləri üçün tədqiq edilmişdir.

DİSSERTASIYANIN ƏSAS MÜDDƏALARI AŞAĞIDAKI İŞLƏRDƏ ÖZ ƏKSİNİ TAPMIŞDIR

AAK-nın siyahısı üzrə resenziyalaşdırılan elmi nəşrlərdə dərc edilmiş məqalələr

1. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Моделирование и

исследование квазистационарных режимов работы ветроэлектрических установок с асинхронными генераторами при частотном управлении // – Москва: Электричество, – 2009, №6, – с. 36-42.

2. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Моментно-мощностные характеристики современных ветроэлектрических установок // – Москва: Электротехника, – 2009. №7, – с. 53-58.

3. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г., Бабаев, М.А., Исламов, Ф.Х., Аббасов, Р.М. Моделирование и исследование режимов работы авиационных синхронных генераторов с постоянными магнитами // Milli Aviasiya Akademiyasının elmi əsərləri, Баку: –2010, №3, – с. 170-178.

4. Mustafayev, R.I., Saidov, R.A., Hasanova, L.H. The comparative analysis of wind power plants (WPP) using efficiency in Absheron peninsula conditions of the republic of Azerbaijan // TPE-Journal International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering IJTPE, 2010 Issue 3, No. 2, Vol.2, p. 18-21.

5. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Моделирование и исследование режимов работы синхронных генераторов ветроэлектрических установок при частотном управлении // – Москва: Электричество, – 2010. №7, – с.34-40.

6. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г., Зейналов Р.Б. Частотный пуск и управление ветроэлектрических установок с синхронным генератором с постоянными магнитами // – Bakı: Azərbaycan Elmi-Tədqiqat və Layihə-Axtarış Energetika İnstitutunun elmi əsərlər toplusu, – 2010. – s. 89-98.

7. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H. Development of world wind-power engineering preliminary feasibility study of 50 MW wind power farm in Azerbaijan // ELECTROScientific – Industrial Journal, Baku: – 2010. v.1, No. 1, – p.25-36.

8. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H. Development and research mathematical models, modes of wind power plants' electromechanical converters // – San Diego: Reliability: theory & applications. Journal is registered in the library of the U.S. congress, – 2011. Vol.2, No.2 (21), – p. 52-66.

9. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Моделирование угла поворота лопастей ветродвигателя ветроэлектрической установки, работающей на электрическую сеть // – Москва: Электротехника, – 2011. №12, – с.22-27.

10. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г., Зейналов, Р.Б. Исследование статических и динамических режимов в ветроэлектрических установках, содержащих асинхронные машины двойного питания // – Bakı: Azərbaycan Elmi-Tədqiqat və Layihə-Axtarış Energetika İnstitutunun elmi əsərlər toplusu, – 2011. – s.44-59.

11. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H. Parallel Operation of Wind Power Farm with Double Fed Induction Generators with Electric Power System // ELECTRO Scientific – Industrial Journal, – Baku: – 2011. Vol.2, No. 1, – p.13-22.

12. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Модель для исследования режимов работы ветроэлектрических установок с асинхронными машинами двойного питания в энергосистеме // – Минск: Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ, – 2012, №3, – с.27-39.

13. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г., Зейналов, Р.Б. Исследование влияния сетевого напряжения на режимы работы ветроэлектрических установок с асинхронной машиной двойного питания // – Bakı: Azərbaycan Elmi-Tədqiqat və Layihə-Axtarış Energetika İnstitutunun elmi əsərlər toplusu, Azərbaycan, –2012, – s.27-41.

14. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H., Musayev, M.M. Modelling starting regim work of the induction generators of wind turbine and small hydroplaning // International Journal of Recent Development in Engineering, – 2013. Vol.1, No. 3, – p. 16-23.

15. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H., Musayev, M.M. Some subjects of compensation of the induction generators reactive power in wind-power and small hydroelectric power plants // – San Diego: Reliability: theory & applications. Journal is registered in the library of the U.S. congress, – 2013. Vol.8, No.4 (31), – p. 2-13.

16. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Влияние значения

сетевого напряжения на режим работы ветроэлектрической установки с асинхронной машиной двойного питания // – Москва: Электротехника, – 2013. №4, – с. 43-49.

17. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Режимы работы ветроэлектрических установок с АМДП в автономной электрической системе // – Bakı: Azərbaycan Elmi-Tədqiqat və Layihə-Axtarış Energetika İnstitutunun elmi əsərlər toplusu, – 2013. – s.36-56.

18. Мустафаев, Р.И., Саидов, Р.А., Гасанова, Л.Г. Исследование установившихся режимов работы частотно-управляемого асинхронного генератора ветроэлектрических установок // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ, Минск: – 2014. №3, – с. 43-48.

19. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Некоторые вопросы регулирования возбуждения синхронных генераторов малых ГЭС // – Баку: Проблемы Энергетики, – 2014. №2, – с. 3-7.

20. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H., Musayev, M.M., Aliyev Q.M. The excitation control and stability of small hydroelectric power stations synchronous generators when operation in power system // – San Diego: Reliability: theory & applications. Journal is registered in the library of the U.S. congress, – 2014. Vol.9, No.4 (35), – p. 29-36.

21. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Универсальная структура математической модели управляемых электрических машин переменного тока // – Москва: Электричество, – 2015. №2, – с. 40-48.

22. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Исследование динамики ветроэлектрических установок, оснащенных синхронными генераторами с постоянными магнитами // – Москва: Электротехника, – 2015. №4, – с. 23-29.

23. Мустафаев, Р.И. Гасанова, Л.Г., Мусаев, М.М, Мамедов Э.М., Набиев Х.И. Некоторые аспекты применения асинхронных машин двойного питания в качестве генератора малых ГЭС // – Баку: Проблемы Энергетики, – 2015. №1, – с. 3-13.

24. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Математическое моделирование управляемых трехфазных асинхронных машин //

– Москва: Электричество, – 2016. №5, – с. 59-65.

25. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H. Study of Starting Duty of Wind Power Plant with Asynchronous Generators // – San Diego: Reliability: theory & applications. Journal is registered in the library of the U.S. congress, – 2016. Vol. 11, No. 4 (43), – p. 38-48.

26. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г., Мусаев, М.М. Исследование статических и динамических характеристик гидроагрегатов малых ГЭС // – Москва: Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, – 2016. №4, – с. 17-21.

27. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г., Мусаев, М.М. Моделирование и исследование гидроагрегатов малых ГЭС с частотно-управляемыми синхронными генераторами с постоянными магнитами // – Минск: Энергетика. Известия ВУЗ и энергетических объединений СНГ, – 2016. Т. 59, №2, – с. 106-121.

28. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Использование регулируемой асинхронной машины двойного питания в синхронном режиме // – Москва: Электричество, – 2017. №10, – с. 60-68.

29. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H. Simplification of Mathematical Model of Double Fed Asynchronous Machine // European Journal of Electrical and Computer Engineering, – 2017. Vol. 1, No. 3, – p. 16-22.

30. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Методика исследования влияния высших гармонических напряжения на режимные параметры синхронного генератора с постоянными магнитами // – Мурманск: Вестник МГТУ, – 2017. Т. 20, № 4, – с. 705-713.

31. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г., Мусаев, М.М. Применение регулируемых электрических машин в гидроагрегатах малых ГЭС, работающих на энергосистему // – Москва: Электротехника, – 2018. №5, – с.38-44.

32. Гасанова, Л.Г. Вопросы пуска синхронных машин с постоянными магнитами // – Баку: Проблемы Энергетики, – 2019. №3, – с. 31-38.

33. Гасанова, Л.Г., Мустафаев, Р.И. Анализ эффективности

работы асинхронной машины с короткозамкнутым ротором при скалярном частотном управлении // – Москва: Электричество, – 2019. №3, – с. 46-54.

34. Гасанова, Л.Г. Фильтрация гармоник частотно-управляемых асинхронных машин двойного питания // – Мурманск: Вестник Мурманского государственного технического университета, – 2019. Т. 22, № 4, – с. 508-512.

35. Гасанова, Л.Г. Обоснование методов исследования режимов работы электрических машин в ветроэлектрических установках // – Баку: Проблемы Энергетики, – 2020. №1, с. 78-83.

Web of Science, Springer və Scopus bazalarına daxil olan xarici nəşrlərdə dərc edilmiş məqalələr

36. Mustafae, R.I., Gasanova, L.G. Torque-power characteristics of modern wind-power facilities // Russian Electrical Engineering. – 2009. Vol. 80, № 7, – p. 406-411.

37. Mustafae, R.I., Gasanova, L.G. Modeling of turning angle of the windmill blades of a working on the power network // Russian Electrical Engineering, – 2011. Т. 82, № 12, – p. 659-664.

38. Mustafae, R.I., Gasanova, L.G. The influence of supply voltage on the operating regime of a wind-power station working on the power network // Russian Electrical Engineering, – 2013. Vol. 84, № 4, – p. 216-220.

39. Мустафаев, Р.И. Гасанова, Л.Г., Мусаев, М.М, Мамедов, Э.М., Набиев, Х.И. Моделирование и исследование режимов работы гидроагрегатов малых ГЭС с машинами двойного питания // – Новочеркасск: Изв. ВУЗов Электромеханика, – 2015. №6, – с. 59-66.

40. Mustafae, R.I., Gasanova, L.G. An investigation of the dynamics of a wind power unit equipped with synchronous generators with permanent magnets // Russian Electrical Engineering. – 2015. Т.86, № 5, – p. 258-263.

41. Hasanova, L.H. Compensation of Reactive Power of Squirrel-Cage Asynchronous Generators, Used in Wind Power Plants and Small Hydroelectric Power Stations // IFAC (International Federation of Automatic Control) Hosting by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Peer review under responsibility of International Federation of Automatic Control. – 2018. – p. 462-467.

42. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H., Musayev, M.M. Using regulated electrical machines in small hydropower plants operating in a power network // Russian Electrical Engineering. – 2018. Т. 89, № 5, p. 322-327.

43. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Моделирование и исследование асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором при скалярном методе частотного управления // – Новочеркасск: Изв. ВУЗов Электромеханика, – 2019. Т. 62, № 5, – с. 37-43.

44. Hasanova, L.H. Method of conversion of double fed machine into synchronous operation mode and its simulation // – San Diego: Reliability: theory & applications. Journal is Registered in The Library of The U.S. Congress USA, – 2019, Vol.14 No.3 (54), – p. 18-24.

45. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H. Using control double fed machine into synchronous operation mode // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering. – 2019. Т. 86. № 5. – p. 258-263.

46. Mustafayev, R., Yusifbayli, N., Hasanova, L. Matrix structure of unified mathematical model of electric AC machines at control // E3S Web of Conferences, ENERGY-21 – Sustainable Development & Smart Management, – 2020. Vol. 209, No. 02023, – p. 1-6.

47. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H. Simulation of wind power plant with double-fed machine when operating in autonomous system in parallel with synchronous commensurable power generator // E3S Web of Conferences, High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED-2020), – 2020. Vol. 178, No. 01034, – p. 1-5.

Digər nəşrlərdə dərc edilmiş məqalələr

48. Mustafayev, R.I., Saidov, R.A., Hasanova, L.H. Modeling and Study of Wind Power Plant's Asynchronous Generator with Saturation Accounting / ICTPE Conference 6th International Conference on “Technical and Physical Problems of Electrical Engineering” – Tebriz: –2010, September 14-16, p. 97-99.

49. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Развитие мировой ветроэнергетики и предварительное технико-экономическое обоснование ВЭС мощностью 50 МВт в Азербайджане // Энергетические связи между России и Восточной Азией: стратегии развития в XXI веке. Объединенный симпозиум, – Иркутск: – 2010. Выпуск 60, – с. 343-349.

50. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H. Mathematical Models of Wind Power Plants' Electromechanical Converters // COIA 2011 Registration form 3rd international conference on control and optimization with industrial. Bilkent University, – Ankara: – 2011. – p. 111-112.

51. Yusifbəyli, N.A., Mustafayev, R.İ., Həsənova, L.H., Zeynalov, R.B. Azərbaycanca külləklərin izodinamik xəritəsi. Əsərin Qeydiyyatı Haqqında Şəhadətnamə, – Bakı: 2011, № 6956.

52. Yusifbayli, N.A., Mustafayev, R.İ., Hasanova, L.H., The modeling mode of operation of wind power farm with double fed asynchronous generators consideration the parameters of the electrical network / ICTPE Conference 8th International Conference on "Technical and Physical Problems of Power Engineering". Ostfold University College, – Fredrikstad: –2012, 5-7 September.

53. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Имитационное моделирование режимов работы ветроэлектрической установки, оснащенной синхронным генератором с постоянными магнитами / Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Международный научный семинар им. Ю.Н.Руденко. Баку, Азербайджан. Проблемы надежности систем энергетики в рыночных условиях, – Баку: – 2013. – с. 486-496.

54. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Сопоставление результатов расчета режимов работы частотно управляемого асинхронного генератора ветроэлектрических установок // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Международный научный семинар им. Ю.Н.Руденко. Надежность либерализованных систем энергетики, – Иркутск: – 2015. – с. 343-349.

55. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H., Musayev, M.M., Mamadov,

E.M., Nabyev, Kh.I. Modeling and Study of Operating Modes of Small Hydro Power Plants with Double Fed Induction Generators // International Conference MEPS'15 Modern Electric Power Systems. –Wroclaw: – 2015. July 6-9, – p.206-211.

56. Mustafayev, R.I., Saidov, R.A., Hasanova, L.H., Musayev, M.M. Study of operating modes of small HPSS' hydroelectric units equipped with synchronous generator / 12th International Conference on “Technical and Physical Problems of Electrical Engineering” University of the Basque Country, – Bilbao: 2016. September, 7-9, – p.78-83.

57. Мустафаев, Р.И., Гасанова, Л.Г. Трёхфазная математическая модель асинхронной машины двойного питания / – Baku: 1st International Conference on energy of Future: Challenges and Opportunities (ICEFCO), – Baku. – 2018. – с. 28-29.

58. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H. Method of conversion of double fed machine into synchronous operation mode and its simulation // 14th International Conference on “Technical and Physical Problems of Electrical Engineering” Nakhchivan State University, – Nakhchivan: –2018. October 15-17, No. 14, – p. 1-6.

59. Hasanova, L.H. Three-coordinated mathematical model of double fed asynchronous machine with frequency control // 15th International Conference on “Technical and Physical Problems of Electrical Engineering” Istanbul Rumeli University – Istanbul, Turkey: –2019. October 14-15, – p. 27-32.

60. Гасанова, Л.Г. Мусаев, М.М. Моделирование и исследование электрических машин в гидроагрегатах малых гидроэлектростанций: Монография, – Баку: Элм, –2024, – с.170.

Müəllifin şəxsi iştirakı

Elmlər doktorluğu dissertasiyası üzrə elmi məqalələr siyahısında verilmiş [32, 34, 35, 41, 44, 59] işləri şəxsən müəllifin özü tərəfindən yazılmışdır. Həmmüəlliflər ilə yazılmış [1-31, 33, 36-40, 42-43, 45-58, 60] işlərində elmi problemin qoyuluşu, onun həll üsulu və yolları müəllifə aiddir.

Dissertasiyanın müdafiəsi 30 may 2025-ci il tarixində saat 15:00 Azərbaycan Texniki Universitetinin bazasında fəaliyyət göstərən ED 2.04 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: AZ 1073, Bakı, 25 Hüseyn Cavid Prospekti.

Dissertasiya ilə Azərbaycan Texniki Universitetinin kitabxanasında tanış olmaq olar.

Dissertasiyanın və avtoreferatın elektron versiyası Azərbaycan Texniki Universitetinin rəsmi saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat ____ aprel 2025-ci il tarixində ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanmışdır: 23.04.2025

Kağızın formatı: 60x84 ,1/16

Həcmi: 77382 işarə

Tiraj: 30