

EİM-İ ÜÇFAZALI DÜZLƏNDİRİCİNİN PARAMETRLƏRİNİN TƏKMİLLƏŞDİRİLMƏSİNİN TƏDQIQI ÜSULLARI

K.K. ƏZİZOVA^{1,2}, L.V. MƏMMƏDOV^{2,3}, G.X. HÜSEYNOVA^{1,4},
N.V. KAZIMOVA⁵

¹Elm və Təhsil Nazirliyi, Fizika İnstitutu¹, Bakı, Hüseyn Cavid 131, AZ1073,

²Azərbaycan Universiteti,

³Bakı Mühəndislər Universiteti,

⁴Azərbaycan Texniki Universiteti,

⁵Azərbaycan Texnologiya Universiteti, Gəncə şəh., Şah İsmayıl Xətai prospekti 103, AZ2011.

E-mail: kama-azizova2025@rambler.ru

Sinusoidal qanunla dəyişən eninə impuls modulyasiyasının müxtəlif növlərinin formalaşdırılması zamanı üçfazlı gərginlik inverterlərinin çıxış gərginliyinin spektrlərinin və keyfiyyət göstəricilərinin müqayisəsi aparılmışdır: birfazlı ikiqütblü EİM, "klassik" üçfazlı EİM, üçüncü harmonikanın modulyasiyaqabağı EİM-sı və "vektorlu" EİM. EİM-sı ilə inverterlərin çıxış gərginliyinin keyfiyyətinin yüksəldilməsi üçün meyarlar təklif edilmiş, çıxış gərginliyinin ən yaxşı keyfiyyətini təmin edən EİM-ləri formalaşdırılma üsulları müəyyən edilmişdir.

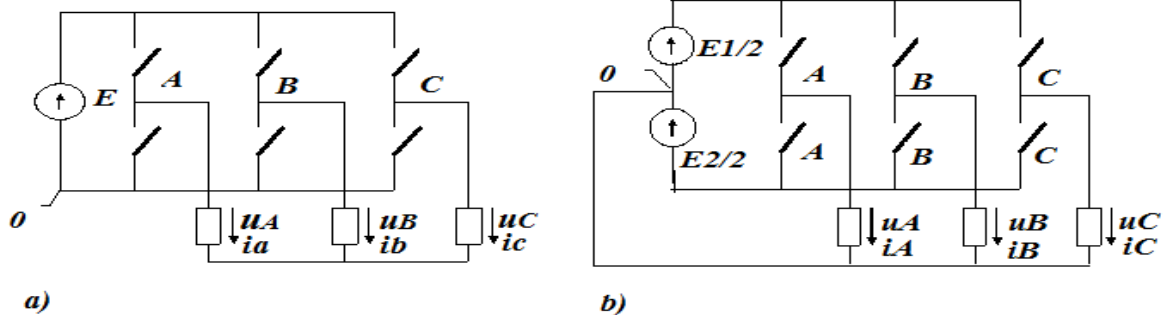
Açar sözlər: üçfazlı inverter, modulyasiya, elektrik intiqalı, tezlik çeviricisi, yarımkəçirici çevirici

DOI:10.70784/azip.2.2025120

Məsələnin qoyuluşu

Dəyişən cərəyan elektrik intiqallarının qidalandırılmasında və sabit tezlikli dəyişən cərəyan qidalandırıcılarının zəmanətli təchizat sistemlərində üçfazlı gərginlik inverterlərindən geniş istifadə edilir. İnverterin çıxışında yüksək keyfiyyətli elektrik enerjisini təmin etmək üçün müxtəlif növ eninə-impuls modulyasiyaları (EİM) tətbiq edilir. Müxtəlif formalı EİM-ləri üzərində aparılmış analizin nəticələri göstərir ki, çoxlu sayda tədqiq olunmuş modulyasiyalı inverterin çıxış gərginliyi onlara müvafiq olanlarına görə seçilir. Bu da onların nəticələrini inverterlərin çıxış gərginliyinin key-

fiyyətini eninə-impuls modulyasiyası ilə obyektiv müqayisə etməyə imkan vermir. Bu işdə məqsəd vahid riyazi modelə əsaslanaraq eyni mülahizələr əsasında EİM-nin formalaşdırılma üsullarından düzgün istifadə edilməsindən ibarətdir. Qeyd etmək lazımdır ki, dövlətlərarası elektrotexniki komissiya (DEK) impulsların eni və tezliyi yaxud bu və başqa sözlə hər ikisinin çıxış parametrlərini müəyyən etmək üçün əsas tezlik müddəti daxilində modulyasiyalı idarəetmə sistemindən istifadə etmək zərurəti yaranır. Əksər ədəbiyyatlarda EİM anlayışı, bir qayda olaraq yalnız sabit keçid tezliyi ilə formalaşma üsullarına aid edilir. Üçfazlı inverterlərin iki əsas transformatorsuz sxemi məlumdur şəkil 1.



Şəkil 1. Üçfazlı inverterlərin transformatorsuz elektrik sxemləri.

1. Üçfazlı körpü inverteri (şəkil 1, a) sıfır nöqtəsi çıxış olmayan bir simmetrik yükü qidalandıran üçün istifadə olunur.

2. "Üç ədəd birfazlı yarımkəçirici" sxemi şəkil 1, b-də qeyri-simmetrik yük daxil olmaqla, sıfır nöqtəli çıxışı olan yükü işlətmək üçün tətbiq olunur.

İdeallaşdırılmış inverterin analizi zamanı belə hesab olunur ki, E -sabit qida gərginliyi döyüntünü ixtisar edir və ideallaşdırılmış açarlar qoşulurlar. Belə bir ideallaşdırma, dövrənin ideal parametrlərinin EİM-sı tətbiq edilmiş növündən asılı olmayaraq inverterin çıxış

gərginliyinin keyfiyyət göstəricilərinə təsir göstərməsi ilə əsaslandırılır.

Şəkil 1-dəki sxemlərin analizi üçün Pspice, Matlab Simulink və digər virtual proqramların məlum paketlərindən istifadə olunur. Bununla yanaşı, periodik təkrarlənən bir neçə yüz və daha çox kommutasiya inverterlərində çeviricilərdəki proseslərin hesablanması, modelləşdirmə təcrübəsinin aparılması çox vaxt tələb edir və nəticələrin ümumiləşdirilməsi üçün lazım olan nəticələrin toplanmasını çətinləşdirir. Bu işi yerinə yetirərkən spektral modelləşdirilmə metodundan, yəni çevirici funksiyaların modifikasiya üsulundan istifadə edilir

ki, bu da təsirin onlarla dəfə artırılmasına imkan verir [4]. Bir sıra rejimlərdə aparılan spektral modelləşmə və Pspice bazasında modelləşmənin nəticələrinin müqayisəsi ümumi nəticələrin eyniliyini göstərir.

EİM-İ çeviricinin çıxış gərginliyinin keyfiyyətinin qiymətləndirilməsi meyarları

Müxtəlif EİM növlərini müqayisə etmək üçün çıxış gərginliyinin keyfiyyətini qiymətləndirilməsinin effektiv meyarlar müəyyən olunmalıdır. Çıxış gərginliyini harmonika əmsalının köməyiylə qiymətləndirmək üçün kifayət qədər məlumat olmur, çünki bu halda alçaq və yüksək tezliklərin harmonikanın yükünə mümkün təsirləri nəzərə alınmır. Çıxış cərəyanı üçün harmonika əmsalı eyni zamanda, yükün parametrlərindən də asılıdır, belə ki, bu əmsal EİM-İ invertorun parametrləri ilə yanaşı inverter-yük sisteminin parametrləri ilə də xarakterizə olunur. Bu səbəbdən, qiymətləndirmənin daha müasir və effektiv meyarlara əsasən aparılması məsələsini aşdıdırılması aktuallaşır.

Şəkil 1b-dəki inverter sxemində, hər fazada müstəqil olaraq ikiqütblü, birləşməli EİM ardıcılığı formalaşır, bu zaman əsas harmoniklərin qarşılıqlı olaraq 120° sürüşməsi nəzarət sistemi tərəfindən həyata keçirilir. Şəkil 2a-da impulsun ön hissəsinin, yaxud kəsiminin modulyasiyası, şəkil 2b-də isə ikitərəfli modulyasiya - impulsun həm ön, həm də arxa hissəsinin müəyyən kəsiminin modulyasiya halında EİM ardıcılığının spektri göstərilmişdir. Burada k -harmonikanın nömrəsi, C_k - k -cı harmonikanın amplitudasıdır. Verilmiş nümunədə, kommutasiya tezliyi $f_k = A f_{\text{çix}} = 48 f_{\text{çix}}$, modulyasiya əmsalı- çıxış gərginliyi impulsunun ən uzun müddətinin kommutasiya intervalları arasındakı müddətə olan nisbəti - $K_m = 0,5$ bərabər olur.

Spektrin bu xarakteri sinusoidal qanunla EİM üçün səciyyəvidir. Spektrin aşağı tezlikli hissəsi yalnız $f_{\text{çix}}$ ($k=1$) tezlikli əsas harmonikanı və tezliyin ətrafında yerləşən f_k kommutasiyalar tezliyi çoxluğundan yaranan harmonik kommutasiyalardan təşkil edilir. İkiqütblü EİM-da əsas harmonikanın amplitudu $1/2EK_m$ -yə bərabərdir. Burada, E - qida mənbəyinin gərginliyidir.

Beləliklə, şəkil 1a - diaqramında bir fazanın EİM ardıcılığı başqa bir faza ilə qarşılıqlı təsir göstərir, buna görə də burada üçfazlı eninə-impuls modulyasiyasının formalaşdırılmasına baxılır, çünki çıxış gərginliyinin spektri əhəmiyyətli dərəcədə dəyişir. Şəkil 1a sxemində çıxış gərginliyinin spektri şəkil 2 b impulsun ön, yaxud kəsiminin modulyasiyası və $2q$ -də ikitərəfli modulyasiyası verilmişdir. Kommutasiya tezliyi $f_k=48f_{\text{çix}}$, modulyasiya əmsalı $K_m=0,5$ -ə bərabər olur. Xətt gərginliyinin spektri faza spektrində olduğu kimidir, yalnız bütün harmonikaların amplitudaları 3 dəfə böyükdür.

Birləşməli və üçfazlı EİM arasındakı fərqlərə aşağıda baxılmışdır. Əvvəlcə onu qeyd etmək lazımdır ki, üçfazlı EİM-nin spektrindəki cəbhələrin iki tərəfli modulyasiyası ilə kommutasiya tezliyinə yaxın olan harmonik komponentlər azalır, lakin kommutasiya tezliyinin ikinci harmonikasının sahəsindəki harmonikalar əhəmiyyətli dərəcədə artır. Bu harmonikalar, tezliyin iki dəfə yüksək olmasına baxmayaraq, daha yüksək

harmonikalar üçün induktiv reaksiya verməsi səbəbindən yük cərəyanına əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərə bilər. Beləliklə, yuxarıda aşkar edilmiş $k_{g,k}$ və $k_{g,2k}$ əmsalları EİM-nin müxtəlif növlərində çıxış gərginliyinin keyfiyyətinin müqayisəsini həyata keçirməyə imkan verir. $A > A_{\text{son}}$ olduqda, kommutasiya tezliklərinin seçilməsindən asılı olurlar, EİM-1 və EİM-2 üçün fərqlənmirlər, sadəcə ön modulyasiya, həmçinin impulsun ön/kəsim modulyasiyası və ya ikitərəfli modulyasiya üsulu və mövcud modulyasiya əmsalından istifadə edilməklə EİM müxtəlifliyinin seçilməsi ilə müəyyən olurlar.

Çıxış gərginliyinin əsas harmonikasının amplitudunun artırılması üsulları

Yuxarıda nəzərdən keçirilən EİM növləri üçün AGÇ- avtonom gərginlik çeviricilərinin faza çıxış gərginliyinin əsas harmonikasının qida mənbəyi gərginliyinə nisbətinin ən böyük qiyməti 0,354-ə bərabərdir. Eyni zamanda, şəkil 1 a-dakı dövrəyə görə idarəolunmayan körpü düzləndiricisindən və inverterdən ibarət olan transformatorsuz bir tezlik çeviricisində çıxış gərginliyi şəbəkə gərginliyinin 0,827 nisbətindən çox olmur. Real çeviricilərdə bu nisbət daha da aşağıdır, çünki çeviricidə gərginlik itkiləri olduğundan kommutasiya şərtlərini yerinə yetirmək zərurətindən modulyasiya əmsalı 1-ə çatmır. Buna görə də, inverterin çıxış gərginliyinin əsas harmonikasının qida mənbəyinin gərginliyinə nisbətinin artırılması məsələsi çox aktualdır.

Bu məsələnin həll edilməsinin yalnız bir yolu var ki, bu da faza potensiallarının - φ_A , φ_B və φ_C impulslarının davam etmə müddətlərinin modulyasiyasının qeyri-sinusoidal qanununun istifadə olunmasıdır, hansı ki, bu modulyasiya qanununun seçilməsi əsas harmonikanın amplitudasının artmasını təmin etməlidir. Əsas harmonikada tələb olunan bu artımı təmin edən modulyasiya qanunları arasında düzbucaqlı və trapesiya qanunlarına görə modulyasiyaları göstərmək olar. Lakin bu modulyasiyaların istifadəsi zamanı inverterin faza və xətti çıxış gərginliklərinin harmonik tərkibi pisləşir: spektrin aşağı tezlikli hissəsində, ilk növbədə çıxış tezliyinin 5, 7, 11 və 13-cü harmonikalarında tərkibi φ_A , φ_B və φ_C EİM ardıcılıqlarından ibarət olan təhrif harmonikaları yaranır. Üçdən artıq eyni ardıcılıqlardan ibarət harmonikalar sıfırıncı harmonikanın ardıcılığı adlanır, simmetrik yükə faza və xətti yük gərginliklərində olurlar.

Buradan əvvəlcə modulyasiya ideyası ortaya çıxır, φ_A , φ_B və φ_C faza potensiallarının impulslarının müddətinin modulyasiyası üçün qeyri-sinusoidal qanunun tətbiqi, hansı ki, əsas harmonikanın amplitudunun artımını təmin edəcəkdir. Bu zaman φ_A , φ_B və φ_C EİM ardıcılığı spektrdə əsas harmonikadan başqa yalnız sıfırıncı harmonikanın ardıcılığından ibarət olacaqdır. Beləliklə, inverterin faza və xətti gərginliklərinin aşağı tezlik spektrində təhrif harmonikalarının olmaması təmin olacaqdır.

Əvvəlcədən modulyasiyanın prinsipi geniş yayılmış simmetrik yüklü üçfazlı inverterlərin eninə-impuls idarəetmə metodunun əsasında yaranmışdır.

Üçüncü harmonikanın əvvəlcədən EİM modulyasiyası

Üçüncü harmonikanın əvvəlcədən EİM modulyasiyası "vektorlu" EİM zamanı spektrdəki fərq, ilk növbədə u_{yA} , u_{yB} , u_{yC} ilə xarakterizə olunurlar ki, bunlar da gərginliklərinin forma və harmonik tərkibindəki fərqlə bağlıdır. Yuxarıdakı məlumatlardan belə nəticə çıxır ki, modulyasiya əmsalının azalması zamanı nəzarət gərginliyinin əyrisində daha yüksək harmoniklərin artması baş verir ki, nəticədə daha yüksək harmonikalar əsas harmonikanı əhəmiyyətli dərəcədə üstələyə bilər.

φ_A , φ_B və φ_C faza potensiallarının EİM ardıcılığını formalaşdırarkən bu harmonikalar kommutasiya tezliyinin çoxalması və kommutasiya tezlikləri sahəsində əlavə kombinasiyalar fərqi yaradır. İdarəetmə gərginliyinin yüksək harmonikaları əsas tezliyə nisbətən daha yüksək tezliyə nail olduqlarından, əlavə kombinasiyalı harmonikaları əsas harmonikanın EİM modulyasiyasına səbəb olaraq birləşmə harmonikalarına nisbətən kommutasiya tezliyindən kənarda yerləşir və amplitudası yüksək olur. Əlavə kombinasiya harmonikalarının yaranması kommutasiya tezliyinin çoxaldığı tezliklərdə və kommutasiya tezliyinə yaxın hissədə kombinasiya harmonikalarının bölgəsinin genişlənməsinə səbəb olur.

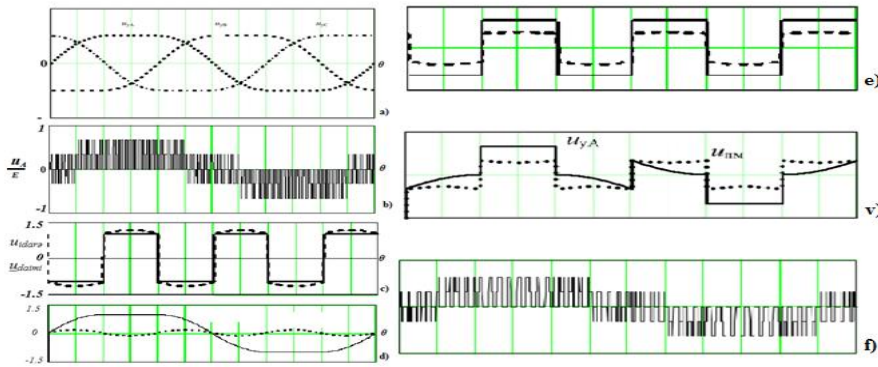
Harmonikalar kombinasiyasının sahəsi əsas harmonikaya doğru genişləndiyindən, A-nın kiçik qiymətlərində də bu harmonikalar əsas tezliyin yaxın ətrafında olurlar. Nisbətən yüksək dərəcələrdə modulyasiya əmsallarının aşağı qiymətlərində də baş verir $K_m < 0,3$. Buna görə də, A_{son} qiyməti "vektorlu" EİM-ı inverterlərində yuxarıda göstərilən digər modulyasiya növlərindəkinə nisbətən daha böyük olur. "Vektorlu" EİM - da $A_{son} = 90-110$, kiçik əmsallarda isə $K_m < 0,2$, $A_{son} = 150-200$ olur. $A < A_{son}$ şərti seçildiyi zaman, spektrin aşağı tezlikli hissəsində təhrif harmonikaları nəzərə çarpan dərəcədə vardır. Yalnız kommutasiya tezliyinin yüksək seçildiyi halda, $f_k = A_{son} f_{çix}$, harmonika əmsallarının k_k və $k_{r,2k}$ keçid tezliyindən asılı olmadığı mü-

şahidə olunur və əsas harmonikanın sahəsi kifayət qədər böyük harmonika kombinasiyalarının mövcudluğundan azad olur.

"Vektorlu" EİM tətbiq edərəkən ön (parça) və iki tərəfli modulyasiya arasındakı fərq böyük dərəcədə düzəldilir. Modulyasiya əmsalının azaldılması ilə ikitərəfli modulyasiyalı EİM-də kommutasiya tezliyinə yaxın olan harmonikaların azalması müşahidə edilmir. Bu, sıfır ardıcılığın komponentlərinin φ_A , φ_B və φ_C potensiallarının spektrlərindəki kiçik rolu ilə əlaqədardır. Nəticədə $k_{r,k}$ və $k_{r,2k}$ əmsalları arasındakı ədədi fərq az olur.

"Vektorlu" EİM və üçüncü harmonikanın ilkin modulyasiyası ilə EİM-nin harmonik əmsallarının ən yaxşı göstəricilərini müqayisə edək, bunun üçün iki modulyasiyanın həyata keçirildiyi zaman qeyd olunan EİM növləri üçün harmonik əmsallarının $k_{r,2k}$ nisbətini tapırıq. Təqdim olunan məlumatlar göstərir ki, üçüncü harmonikanın əvvəlcədən modulyasiyalı olan EİM, "vektorlu" EİM ilə müqayisədə çıxış gərginliyinin daha yaxşı harmonik tərkibini təmin edir və bu üstünlük modulyasiya əmsalının azalması ilə artır. Ancaq bu nəticə tamamilə belə deyil.

"Vektorlu" EİM icra edildiyi zaman çıxış tezliyinin 1/3 periodu ərzində fazaların hər biri passiv olur və passiv fazada heç bir kommutasiya həyata keçirilmir. Ona görə də, vektorlu EİM zamanı güc açarlarının orta kommutasiya tezlikləri EİM-nin digər növlərindəki çıxış tezliklərinin eyni saydakı impulslarının tezlikləri ilə müqayisədə 1,5 dəfə kiçik olur. Əgər "vektorlu" EİM istifadə edilən zaman A parametrini 1,5 dəfə artırısaq, onda inverterdəki kommutasiya itkiləri, əvvəlki kommutasiya tezlikləri ilə EİM-nin digər növlərindəki inverterlə eyni olacaq, cərəyanın harmonika əmsalı isə yüksək harmonikaların tərkib hissələri üçün yükün induktiv reaksiyası zamanı 1,5 dəfə azalacaq. Cihazların orta kommutasiya tezliyinin qorunması halında, gerçək yarımkeçirici cihazlarda keçid proseslərinin inverterin çıxış gərginliyinin harmonik tərkibinə təsiri dəyişməyəcəkdir [3].



Şəkil 2. EİM-nin müxtəlif üsullara görə çıxış siqnallarının formaları

Lakin bu mülahizələrdə bir çatışmazlıq var. Güc açarlarında aktual kommutasiya prosesləri modulyasiya əmsalının minimum və maksimum dəyərini məhdudlaşdırır. Məhdudluğu inverterin çıxış gərginliyində minimum icazə verilən impuls müddəti ilə əlaqələndirilir və tətbiq olunan güc açarlarının xüsusiyyətlərindən asılıdır.

Kommutasiya tezliyinin artması bu minimum icazə verilən müddəti dəyişmir, ona görə də, əgər ilkin kommutasiya tezliyində modulyasiya əmsalının maksimum dəyəri 0,9 olarsa, o zaman keçid tezliyinin 1,5 dəfə artması ilə maksimum modulyasiya əmsalı 0,85-ə qədər azalacaq. Eyni zamanda, çıxış gərginliyinin əsas harmonikasının maksimum amplitudunun

EİM-İ ÜCFAZALI DÜZLƏNDİRİCİNİN PARAMETRLƏRİNİN TƏKMİLLƏŞDİRLMƏSİNİN TƏDQIQI ÜSULLARI

qıda gərginliyi E -yə nisbəti 6% azalır və buna görə keçid tezliyinin artması əsassız ola bilər.

Beləliklə, üçüncü harmonikanın əvvəlcədən modulyasiyalı EİM və "vektorlu" EİM arasındakı seçim birmənalı deyil və konvertorun parametrləri və "enerji mənbəyi - çevirici - yük" sisteminin ətraflı müqayisəsini tələb edir ki, onun üçün bu araşdırmada göstərilən nəticələrdən istifadə edə bilər.

NƏTİCƏLƏR

1. Eninə-impuls modulyasiyalı inverterin çıxış gərginliyinin keyfiyyətini qiymətləndirmək üçün kommutasiya tezliyinin ikiqat artırılması və kommutasiya tez-

liklərinin yaxın yerləşdirilməsi, spektrlərin kombinasiyalı tərkiblərini nəzərə alan harmonik əmsallarından istifadə etmək təklif olunur.

İnvertorun çıxış cərəyanının məlum yük parametrlərində göstərilən harmonik əmsalları yüksək dəqiqliklə hesablamağa imkan verir.

2. EİM-nin formalaşdırılması zamanı çıxış gərginliyinin spektrində əsas harmonikanın amplitud artımı ilə proseslərin bir ortaqlığı müəyyən edilmişdir.

EİM "vektorlu" və üçüncü harmonikanın modulyasiyadan əvvəlki EİM-si ilə reallaşdırılmasında ardıcıl sıfırıncı harmonikalı siqnalın idarəedici modulyasiyaqabağı prinsipindən istifadə olunur, modulyasiyaqabağı siqnalın yalnız formaları fərqlənilir.

- [1] *E.E. Чаплыгин, Н.Г. Калугин.* Влияние снабберов на работу автономных инверторов с ШИМ. *Электричество*, № 1, 2003.
- [2] *E.E. Чаплыгин, Д.В. Малышев.* Спектральные модели автономных инверторов напряжения с широтно-импульсной модуляцией. *Электричество*, № 8, 1999.
- [3] *А.С. Сандлер, Ю.М. Гусяцкий.* Тиристорные инверторы с широтноимпульсной модуляцией для управления асинхронными двигателями. М.: Энергия, 1968. 98 с.
- [4] *E.E. Чаплыгин, Нгуен Хоанг Ан.* Спектральные модели импульсных преобразователей с переменной частотой коммутации. *Электричество*, № 4, 2006.
- [5] *Д.Б. Изосимов, С.Е. Рывкин, С.В. Шевцов.* Симплексные алгоритмы управления трёхфазным автономным инвертором напряжения с ШИМ. *Электротехника*, 1993, № 12.
- [6] *В.В. Коровин, С.Г. Обухов.* Модуляционные методы построения импульсных преобразователей. *Практическая силовая электроника*. 2005, № 19, С.38-43.

К.К. Azizova, L.V. Mamedov, G.X. Huseynova, N.V. Kazimova

RESEARCH METHODS OF ESTIMATING THE PARAMETERS OF A TRANSVERSE IMPULSE MODULATED THREE-PHASE RECTIFIER

The comparison of three-phase inverter's output voltage harmonic spectrum and quality when using various PWM techniques, such as "classical" three-phase PWM, PWM with third harmonic injection, space vector PWM (simplex PWM) is carried out. Performance criterions of output voltage of PWM inverters are proposed. PWM techniques, providing the best quality of output voltage, are obtained.

К.К. Азизова, Л.В. Мамедов, Г.Х. Гусейнова, Н.В. Казымова

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХФАЗНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ ПОПЕРЕЧНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛИРОВАНИЯ

Проведено сопоставление спектров и показателей качества выходного напряжения трехфазных инверторов напряжения при формировании различных видов широтно-импульсной модуляции по синусоидальному закону: однофазной двухполярной ШИМ, «классической» трехфазной ШИМ, ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой, «векторной» ШИМ. Предложены критерии оценки качества выходного напряжения инверторов с ШИМ, определены способы формирования ШИМ, обеспечивающие наилучшее качество выходного напряжения.

Qəbul olunma tarixi: 24.01.2025