

UOT 629.12.066

CƏRƏYAN İNVERTORU ƏSASINDA QURULMUŞ TEZLİK ÇEVİRİCİLƏRİNİN AVAR ELEKTRİK QURĞULARINDA TƏTBİQİNİN TƏHLİLİ

Səlimova A.K., Sultanov E.F., İsmayilov S.S.

“Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası” PHŞ

AZ1000, Bakı şəh., Z.Əliyeva küç., 18

E-mail: afag_sk@mail.ru, elshen_sultanov@mail.ru, sahib-ismayil@bk.ru

Xülasə. Avar elektrik qurğularında (AEQ) güclü elektrik maşınları üçün perspektivli olan cərəyan invertorları əsasında qurulmuş tezlik çeviricilərinin (TÇ) xüsusiyyətlərindən bəhs edilir. Bir və üç fazalı cərəyan invertoru, eləcə də gəmi üçün istehsal olunan cərəyan çeviricisi üçün sxematik həllər təhlil edilmiş, cərəyan invertorlarının sxemlərinin (CSI) qurulmasının əsas prinsipləri və tezlik çeviricisinin iş prinsipi nəzərdən keçirilmişdir. CSI sxemlərinin əsas 394 elementlərinin seçimi aparılmış, cərəyan invertorlarının üstünlükləri, çatışmazlıqları və xüsusiyyətləri verilmişdir.

Аннотация. Рассмотрены особенности преобразователей частоты (ПЧ) на базе инверторов тока, перспективных для электрических машин гребных электроустановок большой мощности. Проанализированы схемные решения одно- и трехфазных инверторов тока, а также преобразователей тока, выпускаемых в морском исполнении, рассмотрены основные принципы построения схем инверторов тока (ИТТ) и принцип работы преобразователей частоты. Сделан выбор основных элементов схем инверторов тока, приведены преимущества, недостатки и характеристики инверторов тока.

Abstract. The characteristics of built-in frequency converters (FC) based on current inverters, which are promising for powerful electric machines in oar electric devices (OED) were discussed in the article. The schematic solutions for one- and three-phase current inverters, as well as current converters manufactured for ships, considered the basic principles of constructing current inverter circuits (CSI) and the working principle of frequency converters were analyzed in the article. The selection of the main elements of CSI schemes was made, the advantages, disadvantages and characteristics of current inverters were presented.

Açar sözlər: tezlik çeviricisi (TÇ), cərəyan invertorları, avar elektrik qurğuları (AEQ), vahid elektrikoenergetika sistemləri, tədqiqat gəmiləri

Ключевые слова: преобразователь частоты (ПЧ), инверторы тока, лопастные электроустановки (ВЭУ), комплексные электроэнергетические системы, научно-исследовательские суда

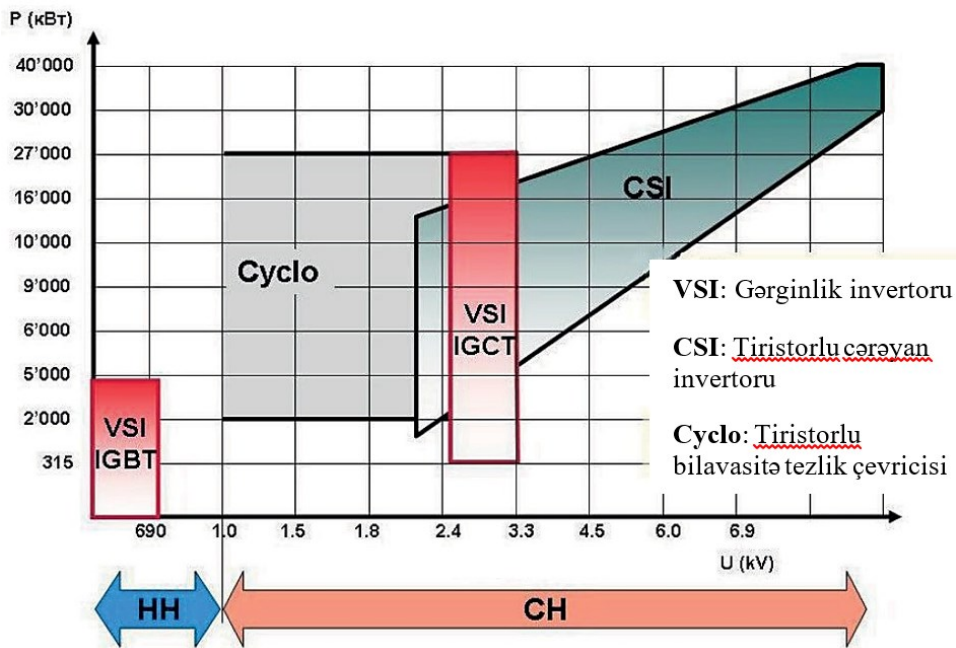
Key words: frequency converter (FC), current inverters, oar electric devices (OED), integrated electric power systems, research vessels

Giriş. Dəniz donanmalarının gəmilərinin avar elektrik qurğularında tətbiq edilən elektrik maşınlarının gücünün tələbatı uyğun olaraq artması, daha güclü elektrik çeviricilərinin tətbiq edilməsini zəruri edir. Hazırda dəniz donanmasının gəmilərində sabit cərəyan bəndi olan TÇ –ri geniş istifadə olunur. Bu cür çeviricilər manevr qabiliyyətini, istehsal ehtiyaclarını və gəminin təhlükəsizliyini təmin edən güclü elektrik ötürücülərini idarə etmək üçün istifadə olunan sabit cərəyanın paylanma şinlərini təşkil etmək qabiliyyətinə malikdir. İlk növbədə bunlar köməkçi sükan qurğuları, yük nasosları və kompressorlar, yanğın nasosları və lafetlərdə quraşdırılmışdır [6,8].

ABB şirkətinin proqnozuna əsasən, diaqramlarda göstəriləyi kimi, cərəyan invertorlarından əsasən yüksək güclər və yüksək gərginliklər üçün istifadə etmək məqsəduyğundur (şəkil 1). Müasir gəmi invertorlarının işi gərginliyi 10 kV-a, gücü isə 50 MVt-a çata bilər.

Əsas hissə. Cərəyan invertorunun (CSI-Current Source Inverter) ilkin olaraq konstruksiyası, sadə idi və mürəkkəb element bazası tələb etmirdi. Onun iki xüsusiyyəti var:

- invertorun girişi nəzəri olaraq sonsuz bir induktivliyə malik olmalıdır, onda invertorun giriş dövrəsi birbaşa cərəyan mənbəyi olacaqdır. Təcrübədə, yük müqavimətinin aktiv komponentindən minimum iş tezliyində induktorun induktiv müqavimətinin mütləq dəyərində 5-6 dəfə yüksək olması kifayətdir. Tiristorun dəyişdirilməsi prosesində tiristor açarının çıxışında "dəyişən" cərəyan, daha doğrusu, əks qütblü sabit cərəyanın düzbucaqlı impulsları baş verəcək;
- düzbucaqlı cərəyan impulslarını minimal təhriflə ötürmək üçün invertorun yükü daxili dinamik müqaviməti sıfıra yaxın olan dövrə olmalıdır. Bu məqsədlə, yükə paralel olaraq, impuls cəbhələrinin göründüyü anda yükü manevr edən bir kondensator bağlanır. Beləliklə, cərəyan invertorunun çıxış dövrəsinin xüsusiyyətləri qoşulma anlarında gərginlik mənbəyinin xüsusiyyətlərinə yaxındır.



Şəkil 1. Müxtəlif növ invertor və TÇ-nin tətbiqində gərginlik və güc aralıqları

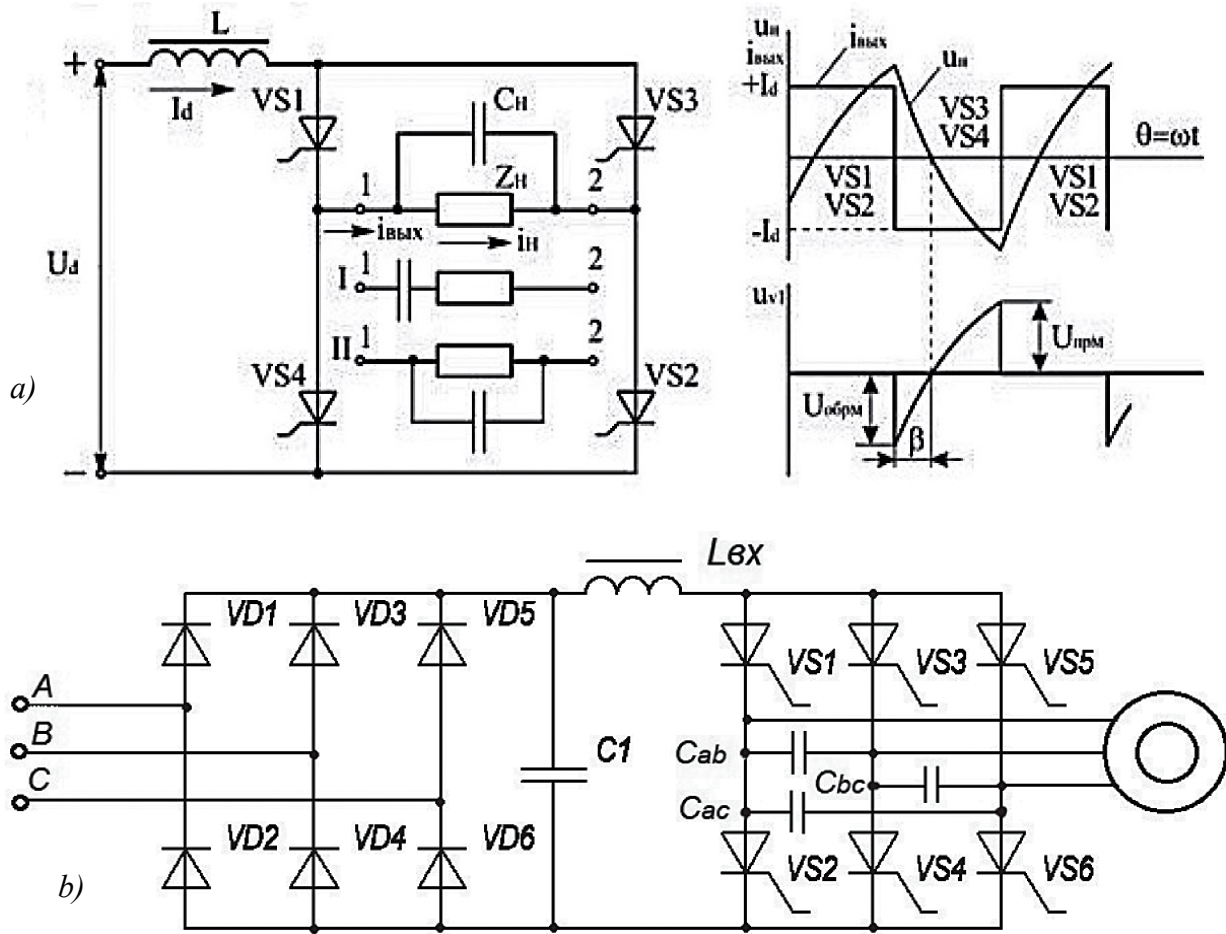
Çıxış cərəyanının forması i_g yalnız tiristorların qoşulma sırası ilə müəyyən edilir və gərginliyin forması yükün təbiətindən asılıdır. Avtonom invertorlar təbii və süni kommutasiya ilə işləyə bilər. Kompensasiya edilmiş sinxron mühərriklərdə, fırçasız mühərrikin stator dolaqlarında və s. işləyərkən avtonom invertorun təbii kommutasiyası yer alır. Bununla belə, ən çox tiristorlarla hazırlanmış avtonom invertorlarda ventillərin süni kommutasiyası tətbiq olunur.

Cərəyan invertorunun ümumi yükü tutum xarakterli olmalıdır. Bu halda, kondensator C_g yalnız yükün Z_g reaktiv gücünü deyil, həm də invertorun reaktiv gücünü kompensasiya etməlidir (şəkil 2, a). Bu o deməkdir ki, bağlanma klapanına tiristorların ani kommutasiyası şərti ilə, $\beta = \delta$ bucağı ilə müəyyən edilmiş və onun idarəetmə xassələrini bərpa etmək üçün zəruri olan müddət ərzində mənfi gərginlik tətbiq edilməlidir. C_g kondensatorundakı gərginlik yükün və tiristorun U_{V1} gərginliyinə bərabərdir. Çıxış cərəyanının tezliyini tənzimləyərkən, δ bucağının sabitliyini qorumaq üçün C_g kondensatorunun tutumunu tezliyin kvadratına tərs mütənəsb olaraq dəyişdirmək lazımdır. Bu, aşağı tezliklərdə çox böyük bir tutum dəyəri ilə nəticələnir.

Beləliklə, şəkil 2, b-də göstərilən sxem praktiki olaraq istifadə edilmir, lakin daha mürəkkəb sxemlər istifadə olunur. Invertorun çıxış signalının keyfiyyətini yaxşılaşdırmaq üçün eninə impuls

modulyasiyasından (PWM) istifadə olunur [1,2]. Gəmilərdə istifadə edilən çoxsəviyyəli inverterlərdə olduğu kimi, daha çox effekt əldə etmək üçün eninə amplitud modulyasiyasından (APWM) istifadə olunur [3,4].

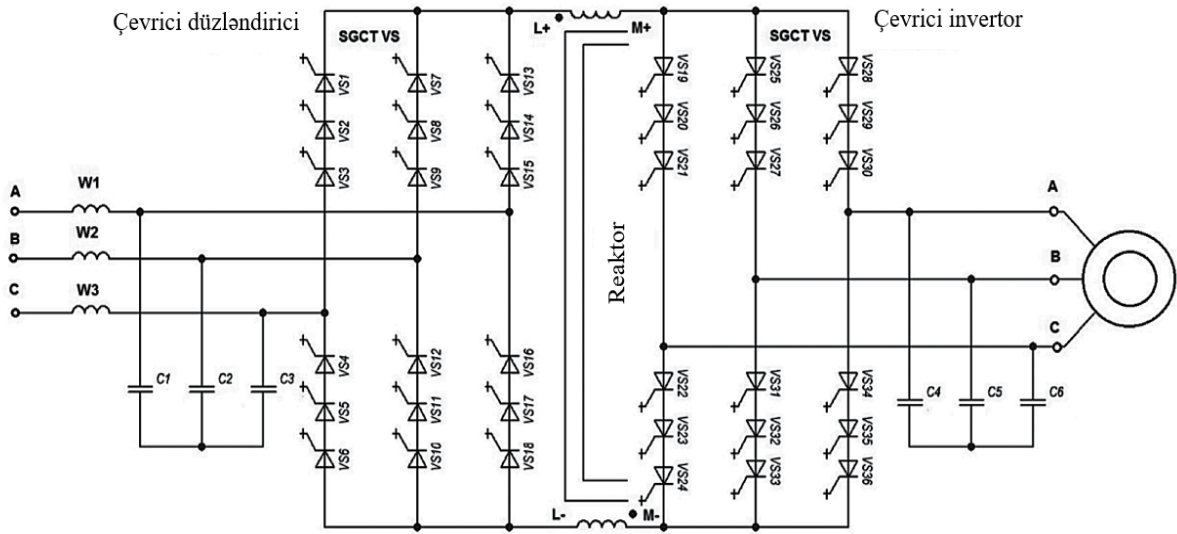
Hər bir faza üçün çoxfazlı inverterin işi şəkil 2-də göstərilən bir fazlı çeviricinin işinə bənzəyir. VS1 və VS2 açıq olduqda, cərəyan soldan sağa axır. Bu halda kommutasiya kondensatoru U_d gərginliyinə qədər doldurulur. Kondensatorun sol tərəfində "müsbət" olacaq. Kondensatordan keçən cərəyan yalnız kommutasiya anında axır, buna görə də kommutasiya edici adlanır. VS3 və VS4 tiristorları açılan kimi (diaqramda –VS1 və VS4 - sonra C_{ab} üçün VS3 və VS2), əvvəllər açıq olan tiristorlar U_c əks (bloklama) gərginliyinin təsiri altında olacaq və kilidlənməyə başlayacaq. Buna görə də, adi cərəyan çeviricilərinin sxemlərində sadə bloklanmayan tiristorlar istifadə edilə bilər.



Şəkil 2. Cərəyan inverterinin sxemi:

a - birfazlı cərəyan inverteri, cərəyan və gərginliyin asılılıq əyrisi
 b - keçid kondensatorlu üçfazlı cərəyan inverterliq əyrisi

Şəkil 3-də göstərilmiş TÇ–sinin sxemi PowerFlex™ 7000 TÇ –də 6000 - 6600 V gərginliklər üçün dəniz gəmilərində istifadə olunur. TÇ–nin girişində PWM düzləndiricisi (aktiv filtrlə) və çıxışında - PWM ilə cərəyan inverteri vardır.



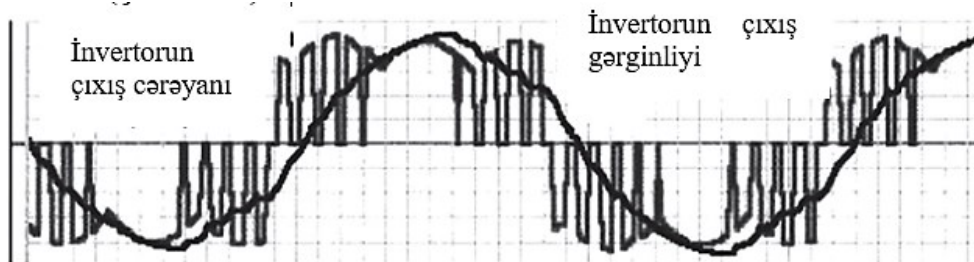
Şəkil 3. *Eninə impuls modulyasiyalı və cərəyan inverterlu TÇ–nin sxemi*

PowerFlexTM 7000, Rockwell Automation kompaniyasının üçüncü nəsillə yüksək gərginlikli intiqallarının nümayəndəsidir. TÇ –si sxemində simmetrik idarəetmə elektrodu olan SGCT (Symmetrical Gate Commutated Thyristor) tiristorları istifadə olunur. SGCT integrasiya edilmiş drayver ilə qapanan tiristorun (GTO- Gate Turn-Off thyristor) modifikasiyasıdır. Drayverin SGCT-yə yaxın yerləşdirilməsi idarəetmə dövrəsinin aşağı induktivliyi ilə nəticələnir ki, bu da güc komutasiya qurğusunun daha bircinsli və səmərəli idarə edilməsini təmin edir. SGCT tiristoru IGCT cihazı ilə eyni xüsusiyyətlərə malikdir, onlar bir sıra çeviricilərdə istifadə olunur, lakin SGCT 6500 V-a qədər gərginliyi NPT strukturu (Non-Punch-Through Structure) hesabına yalnız düz deyil, həm də əks istiqamətdə saxlamaq (bloklamaq) qabiliyyətinə malikdir.

PowerFlex 7000L tipli çeviricilərdə SGCT tiristorlarının istifadəsi əhəmiyyətli üstünlüklərə malikdir [5]:

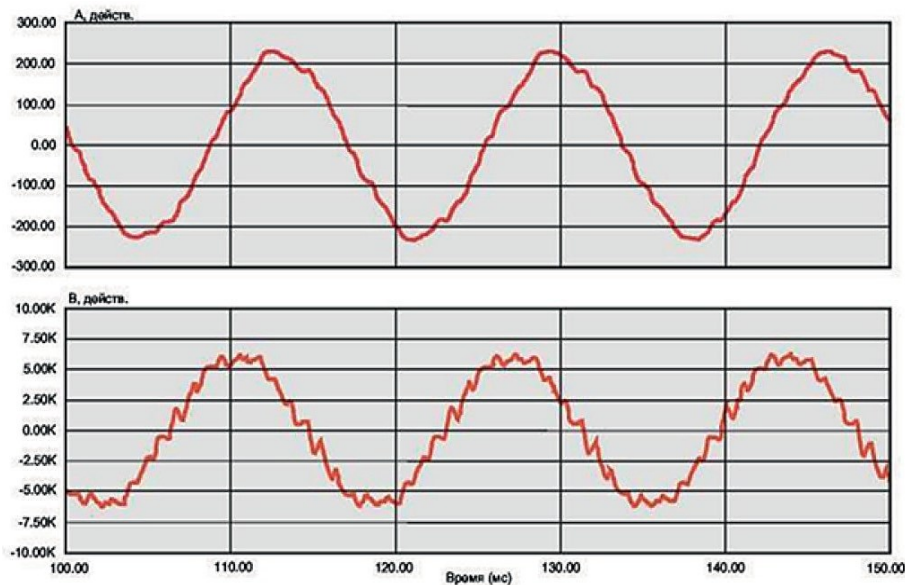
- dövrənin konstruksiyasının sadələşdirilməsi və kondensatorun tutumunun təxminən 10 dəfə azalması;
- daha yüksək modulyasiya tezliyində (420-540 Hs) PWM-nin formalaşması və nəticədə passiv komponentlərin ölçüsünün 50% azalması;
- elektrik intiqalında elektromaqnit və elektromexaniki keçid proseslərinin xüsusiyyətlərinin ümumiyyətlə təkmilləşdirilməsi;
- komponentlərin sayını azaltmaq və etibarlılığını artırmaq, TÇ–nin ölçüsünü azaltmaq.

Invertorun çıxış cərəyanının formasının yaxşılaşdırılması cərəyanın hər yarım dövrəsini trapesiya qanununa uyğun olaraq müddəti dəyişən cərəyan impulslarının ardıcılığı şəklində formalaşdırmaqla əldə edilir (şəkil 4).



Şəkil 4. *EİM–li invertorun çıxışında gərginlik və cərəyan*

İnvertorin çıxışındakı kondensatorlar, çıxışda cərəyan invertoru olan cərəyan impulsları ilə bir qayda olaraq, onlarda cərəyan artımına yol verməyən induktiv empedansa (transformatorların, asinxron mühərriklərin səpələnmə induktivliyi) malik Z_Y yükü arasında "enerji buferi" funksiyasını yerinə yetirir. Buna görə də, avar mühərrikinin gərginlik və cərəyan qrafikləri (bir faza üçün) şəkil 5 –də göstərilən formaya malikdir.



Şəkil 5. *Tam yüklə və nominal sürətdə mühərrikin cərəyanı və gərginliyinin forması*

Kondensatorun yükə görə necə qoşulmasından asılı olaraq, cərəyan və gərginlik invertorları paralel, ardıcıl və ardıcıl-paralel invertorlara ayrılır. Paralel invertorda kommutasiya kondensatoru yüklə paralel olaraq qoşulur.

Cərəyan invertorunun xarici xarakteristikası şəkil 6–da göstərilmişdir. Yüksüz işləmə rejimində, C kondensatoru U gərginliyinə kimi doldurulduqda, tiristorlar açılmağı dayandırdığından invertor işləmir. Yüksək yük cərəyanı ilə, C kondensatorunda gərginlik sürətlə azaldıqda (t_c vaxtı azalır), sürüşmə baş verə bilər, yəni işdən çıxan tiristorların bağlanmağa vaxtı olmayacaq. Dönmə zamanı dövrdəki cərəyan yalnız L induktorunun aktiv müqaviməti ilə məhdudlaşdırılacaq. Buna görə də, avtonom cərəyan invertoru məhdud yük cərəyanlarında işləyə bilər. Dəyişən çıxış gərginliyinin sinusoidinin hissələri ilə ifadə olunan t_c zamanını β bucağı kimi qəbul etmək olar.

İnvertorin normal işləməsi üçün aşağıdakı şərt yerinə yetirilməlidir:

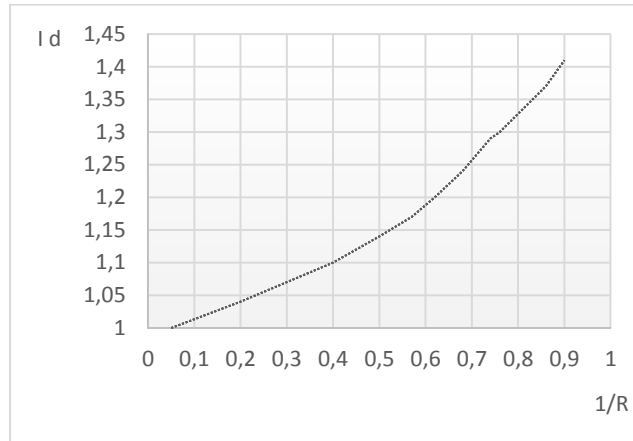
$$\beta \geq \omega t_{cix} \quad (1)$$

Həmçinin β – bucağı aşağıdakı kimi də ifadə edilə bilər:

$$\beta = Y/Y_Y \cos \varphi - tg \varphi_Y \quad (2)$$

$$\varphi_Y = \arctg X_Y/R_Y.$$

Burada $Y_C = \omega C$ – C kondensatorunun keçiricilik modulu; $Y_Y = 1/Z_Y$ – yükün keçiricilik moduludur.



Şəkil 6. Cərəyan invertorunun xarici xarakteristikası

Yükdəki gərginlik və C kondensatorunun tutumunun tələb olunan qiyməti əvvəlcədən müəyyən edilə bilər. Aktiv və reaktiv güclərin balansından alınan yük parametrlərinin funksiyaları şəklində təqdim edilə bilər:

$$P_Y = U_c I_c = U_Y I_Y \cos \beta; Q_Y = P_Y \tan \beta; Q_I = Q_K - Q_Y = U_Y^2 \omega C - P_Y \tan \varphi_H.$$

burada U_c – yükdə dəyişən gərginliyin cari qiyməti, I_c – yükdə dəyişən cərəyanın cari qiyməti, P_Y – yükün aktiv gücü; Q_K – kondensatorun reaktiv gücü; Q_Y – yükün reaktiv gücü; Q_I – invertorun istehlak etdiyi reaktiv güc.

Yükdə əsas harmonikanın dəyişən cərəyan gərginliyinin effektiv qiyməti

$$U_Y = \pi/2(\sqrt{2} \cdot U_c)/C \cos \beta$$

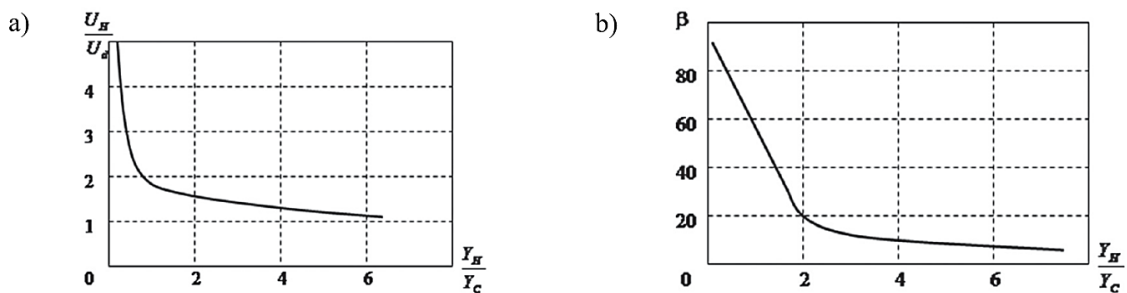
Bu ifadədə (2) ifadəsini nəzərə alsaq, aşağıdakı ifadəni yazı bilərik

$$U_Y = \pi/2(\sqrt{2} + \omega C/(Y_Y \cos \varphi_Y - \tan \varphi_Y)^2 \quad (3)$$

Kondensator tutumunun tələb olunan qiyməti isə aşağıdakı ifadə ilə hesablanır.

$$C = P_Y(\tan \beta + \tan \varphi)/\omega U_Y^2 \quad (4)$$

Cərəyan invertorunda dəyişən çıxış gərginliyinin tezliyi geniş diapazonda dəyişə bilməz, çünki L drosselinin induktivliyi sonlu bir qiymətə malikdir və tezliyin azalması ilə sxemdə drossel artıq cərəyan generatoru rejimini saxlaya bilməyəcək (şəkil 7).



Şəkil 7. Invertorun çıxış gərginliyinin (a) və β (b) bucağının yük parametrlərindən və C kondensatorunun tutumundan asılılıqları

Təhlilə əsasən, gəmilərdə tətbiqi geniş miqyas alan cərəyan invertorları ilə bağlı aşağıdakıları qeyd etmək olar:

- gərginliyin kəskin düşməsi sahəsi ilə xarici xarakteristikaya malikdir;
- yüksüz işləmə rejimlərinə icazə vermir və yük cərəyanının sərhəd qiymətinə məhdudiyyət qoyulur;
- yükün dəyərindən asılı olan çıxış gərginliyi formasına malikdir;
- inersiya çeviricidir, çünki rejimin dəyişmə sürəti böyük L_d induktivliyinə malik reaktorda cərəyanın dəyişmə sürəti ilə müəyyən edilir;
- çıxış gərginliyinin aşağı tezliklərini əldə etmək üçün kifayət qədər rəasional deyil, çünki bu reaktorun həmçinin kondensatorun çəkisini və ölçüsünü artırır.

Çatışmazlıqların təsirini azaltmaq və ya bəzilərini aradan qaldırmaq üçün klassik sxem adətən aşağıdakı dəyişikliklərlə modifikasiya olunur:

- invertorun çıxışında əlavə kondensatorların daxil edilməsi;
- ayırma ventillərinin tətbiqi;
- əks cərəyan ventillərinin tətbiqi;
- tiristor-induktiv tənzimləyicinin tətbiqi;
- AEQ üçün zəruri olan əks əlaqənin tətbiqi;
- invertorun çıxış cərəyanının eninə-impuls tənzimlənməsinin tətbiqi;
- vektor (faza) tənzimlənməsinin tətbiqi.

Nəticə. Gəmi AEQ-da güclü elektrik maşınları üçün perspektivli olan cərəyan invertorlarına əsaslanan TÇ-nin istifadəsi və konvertorların xüsusiyyətləri araşdırılmışdır. Aparılmış təhlilə əsasən, gəmilərdə tətbiqi geniş miqyas alan cərəyan invertorlarının üstünlükləri və çatışmazlıqları qeyd edilmişdir. Dünya ölkələrində istifadəsinə geniş tələbat duyulan AEQ-dan ölkəmidə gələcəkdə tikilməsi planlaşdırılan gəmilərimizdə tətbiqi məqsədə uyğundur. Belə olan təqdirdə yeni tikilən gəmilərimizdə, müasir idarə və işəburaxma sistemləri ilə təmin edilmiş AEQ -nın sahib olduğu bütün üstünlükləri əldə etmək olar.

Ədəbiyyat

1. НЭС «Академик Трешников». Военно-технический сборник «Бастион». [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://bastion-karpenko.narod.ru/22280.html> (дата обращения: 20.08.2017).
2. Radan D. Power electronic converters for ship propulsion electric motors / D. Radan. — Trondheim, Nor-way: NTNU, 2005. - 23 p.
3. Романовский В. В. Гребные электрические установки для арктических ледоколов / В. В. Романовский // Морской вестник. - 2015. - № 4 (56). - С. 53–54.
4. Гармаш Д. Суда спасатели: новые подходы к концепции создания / Д. Гармаш, Т. Наумова, М. Темкин, П. Мартулев // Морской флот. - 2014. - № 5. - С. 36–46.
5. Rockwell Automation [Электронный ресурс]. - Режим доступа: www.rockwellautomation.com (дата обращения – 23.09.2022).
6. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники: учебник: в 2 ч. / Г. С. Зиновьев. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. - Ч. 2. - 197 с.
7. Дмитриев Б. Ф. Судовые полупроводниковые преобразователи: учебник / Б. Ф. Дмитриев, В. М. Рябенский, А. И. Черевко, М. М. Музыка. - Архангельск: Изд-во САФУ, 2015. - 556 с.
8. Быков А. С. Гребные электрические установки атомных ледоколов / А. С. Быков, В. В. Башаев, В. А. Малышев, В. В. Романовский. - СПб.: Элмор, 2004. - 320 с.
9. Силовые полупроводниковые устройства в цепях электрических машин. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/386.pdf> (дата обращения: 20.08.2022).

Мəqalə qəbul olunub: 18.10.23
Təvsiyə edib: dos. İsmayilov A.Ş.