



Tiristorli boshqariluvchi reaktiv quvvat kompensatorlarida energiya samaradorlik masalalari

Olimjon Z. Toirov¹, Shoxrux Sh. Azimov^{1,a)}

¹ DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; olimjon.t@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-0458-4878>

^{1,a)} PhD tayanch doktorant, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston azimovshohruh@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-6273-1093>

Dolzarbliigi: Temir yo'l elektr ta'minoti tizimlarida tortish yuklamalari poyezdlarning harakat rejimiga bog'liq holda keskin o'zgarib turadi, bu esa kontakt tarmoq va tortuvchi nimstansiyalarda reaktiv quvvat miqdorining ortishiga olib keladi. Reaktiv quvvatning yuqori bo'lishi kuchlanish pasayishiga, quvvat koeffitsientining kamayishiga va elektr energiyasi sifatining yomonlashishiga sabab bo'ladi. Reaktiv quvvat kompensatsiya tizimlarida yuzaga keladigan nosozliklar tortish jarayonining barqarorligiga ta'sir qiladi, poyezdlar tezligining pasayishi va yuk tashish hajmining qisqaradi. Amaldagi an'anaviy kompensatsiya vositalari temir yo'l tizimlariga xos bo'lgan o'zgaruvchan va nosimmetrik yuklamalar sharoitida yetarli aniqlik va tezkorlikni ta'minlamaydi. Shu sababli temir yo'l elektr ta'minoti tizimlari uchun reaktiv quvvatni tezkor, ishonchli va energiya samarador usulda kompensatsiya qiluvchi qurilmalarni tadqiq etish dolzarb hisoblanadi.

Maqsad: Mazkur tadqiqotning maqsadi temir yo'l elektr ta'minoti tizimlarida reaktiv quvvatning kuchlanish barqarorligi va quvvat koeffitsientiga ta'sirini ilmiy asosda tahlil qilish, tiristor orqali boshqariladigan kondensator asosidagi reaktiv quvvat kompensatsiya tizimining ishlash xususiyatlarini baholash hamda uning energiya samaradorligi va ishonchlilik ko'rsatkichlarini oshirish imkoniyatlarini aniqlashdan iborat.

Usullar: Tadqiqotda reaktiv quvvatni aniqlash va baholash uchun sinusoidal elektr zanjirlar nazariyasiga asoslangan aktiv, reaktiv va to'liq quvvat formulalaridan foydalanildi. Reaktiv quvvatni real vaqt rejimida hisoblash va boshqarish maqsadida Akagi tomonidan taklif etilgan oniy quvvat nazariyasi asosida matematik model tuzildi va tezkor boshqaruv algoritmlariga mosligi asoslandi. Turli reaktiv quvvat kompensatorlarining texnik xususiyatlari solishtirma tahlil qilindi. Tiristor orqali boshqariladigan kondensator qurilmasida issiqlik ajralishi, termik qarshilik zanjiri, tabiiy va majburiy havo hamda suyuqlik yordamida sovitish usullari, shuningdek, kommutatsiya jarayonlari qisqacha tahlil qilindi.

Natijalar: Tiristor orqali boshqariladigan kondensatorni yulduzsimon ulanish sxemasida qo'llashning texnik afzalliklari aniqlandi. Ushbu ulanish har bir faza bo'yicha reaktiv quvvatni alohida kompensatsiya qilish imkonini berib, uch fazali nosimmetrik yuklama sharoitida kuchlanish barqarorligini ta'minlashda samarali ekanligi isbotlandi. Tadqiqot natijalari kompensatsiya tizimining umumiy samaradorligi faqat elektr sxema tanloviga emas, balki tiristorlarning issiqlik rejimi, sovitish tizimining ishonchliligi va texnik xizmat ko'rsatishning to'g'ri tashkil etilishiga bevosita bog'liq ekanini ko'rsatdi.

Kalit so'zlar: temir yo'l elektr ta'minoti tizimi, reaktiv quvvat kompensatsiyasi, tiristor orqali ulanib-ajratiladigan kondensator, sovitish tizimi, saqlash tizimi, uch fazali nosimmetrik yuklama, quvvat koeffitsienti, tiristorlarning issiqlik rejimi, sovitish tizimi, elektr energetika tizimi.

For citation: Toirov O.Z., Azimov Sh.Sh. Energy efficiency issues of thyristor-controlled reactive power compensators. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2025, no. 4, pp. 94-102.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18515822>

Received: 06.04.2025

Revised: 19.04.2025

Accepted: 10.07.2025

Published: 27.12.2025

Copyright: © Olimjon Z. Toirov, Shokhrux Sh. Azimov, 2025. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Вопросы энергоэффективности тиристорно-управляемых компенсаторов реактивной мощности

Олимжон З. Тоиров¹, Шохрух Ш. Азимов^{1,a)}

¹ DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; olimjon.t@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-0458-4878>

^{1,a)} докторант, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; azimovshohruh@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-6273-1093>

Актуальность: В системах электроснабжения железных дорог тяговые нагрузки резко изменяются в зависимости от режима движения поездов, что приводит к увеличению объёма реактивной мощности в контактной сети и тяговых подстанциях. Повышенное значение реактивной мощности вызывает снижение напряжения, уменьшение коэффициента мощности и ухудшение качества электрической энергии. Неисправности в системах компенсации реактивной мощности оказывают негативное влияние на устойчивость тягового процесса, приводят к снижению скорости движения поездов и сокращению объёмов грузоперевозок. Применяемые традиционные средства компенсации не обеспечивают достаточной точности и быстроты действия в условиях переменных и несимметричных нагрузок, характерных для железнодорожных систем. В связи с этим исследование устройств, обеспечивающих быстрое, надёжное и энергоэффективное компенсирование реактивной мощности в системах электроснабжения железных дорог, является актуальной научно-практической задачей.



Цель: Целью данного исследования является научно обоснованный анализ влияния реактивной мощности на устойчивость напряжения и коэффициент мощности в системах электроснабжения железных дорог, оценка рабочих характеристик системы компенсации реактивной мощности на основе тиристорно-управляемого конденсатора, а также определение путей повышения её энергоэффективности и надёжности.

Методы: В исследовании для определения и оценки реактивной мощности использованы формулы активной, реактивной и полной мощности на основе теории синусоидальных электрических цепей. Для расчёта и управления реактивной мощностью в режиме реального времени применена математическая модель, основанная на теории мгновенной мощности, предложенной Акага, и обоснована её пригодность для быстродействующих алгоритмов управления. Проведён сравнительный анализ технических характеристик различных компенсаторов реактивной мощности. В тиристорно-управляемом конденсаторе проанализированы процессы тепловыделения, цепь тепловых сопротивлений, методы охлаждения (естественное и принудительное воздушное, жидкостное), а также коммутационные процессы.

Результаты: Установлены технические преимущества применения тиристорно-управляемого конденсатора при звёздной схеме соединения. Показано, что данная схема обеспечивает раздельную компенсацию реактивной мощности по фазам и эффективно поддерживает устойчивость напряжения в условиях трёхфазной несимметричной нагрузки. Результаты исследования показали, что общая эффективность системы компенсации определяется не только выбором электрической схемы, но и тепловым режимом тиристоров, надёжностью системы охлаждения и правильной организацией технического обслуживания.

Ключевые слова: система электроснабжения железных дорог, компенсация реактивной мощности, тиристорно-коммутируемый конденсатор, система охлаждения, система обслуживания, трёхфазная несимметричная нагрузка, коэффициент мощности, тепловой режим тиристоров, электроэнергетическая система.

Energy efficiency issues of thyristor-controlled reactive power compensators

Olimjon Z. Toirov¹, Shokhrukh Sh. Azimov^{1,a)}

¹ DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; olimjon.t@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0458-4878>

^{1,a)} PhD candidate (Basic Doctoral Student), Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; azimovshohruh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6273-1093>

Relevance: In railway power supply systems, traction loads vary sharply depending on train operating modes, which leads to an increase in reactive power in the contact network and traction substations. High levels of reactive power cause voltage drops, a reduction in the power factor, and deterioration of power quality. Failures in reactive power compensation systems negatively affect traction stability, resulting in reduced train speeds and decreased freight transportation volumes. Conventional compensation devices do not provide sufficient accuracy and response speed under variable and unbalanced load conditions characteristic of railway systems. Therefore, the study of devices that ensure fast, reliable, and energy-efficient reactive power compensation in railway power supply systems is a relevant scientific and practical task.

Aim: The objective of this study is to conduct a scientifically grounded analysis of the impact of reactive power on voltage stability and power factor in railway power supply systems, to evaluate the operating characteristics of a reactive power compensation system based on a thyristor-controlled capacitor, and to identify ways to improve its energy efficiency and reliability.

Methods: In this study, formulas for active, reactive, and apparent power based on sinusoidal circuit theory were used to determine and evaluate reactive power. To calculate and control reactive power in real time, a mathematical model based on the instantaneous power theory proposed by Akagi was developed, and its suitability for fast control algorithms was substantiated. A comparative analysis of the technical characteristics of various reactive power compensators was performed. In the thyristor-controlled capacitor, heat dissipation processes, the thermal resistance chain, cooling methods (natural and forced air cooling, and liquid cooling), as well as commutation processes were analyzed.

Results: The technical advantages of applying a thyristor-controlled capacitor with a star connection scheme were identified. This configuration enables independent phase-by-phase reactive power compensation and effectively maintains voltage stability under three-phase unbalanced load conditions. The results show that the overall efficiency of the compensation system depends not only on the selected electrical scheme but also on the thermal operating conditions of the thyristors, the reliability of the cooling system, and proper organization of maintenance.

Keywords: railway power supply system, reactive power compensation, thyristor-controlled capacitor, cooling system, maintenance system, three-phase unbalanced load, power factor, thyristor thermal operating mode, electric power system.

1. Kirish (Introduction)

Iqtisodiyotining jadal rivojlanishi, yirik va kichik korxonalarining ko'payishi, aholining hayot sifati oshishi natijasida uy xo'jaliklarining energiya iste'moli ham sezilarli darajada oshmoqda. Elektr tarmoqlariga bo'lgan talab ortib borayotgani sababli energiya tizimining barqaror ishlashiga bo'lgan talab ham kuchaymoqda. Elektr tarmoqlaridagi reaktiv quvvatning ta'siri juda katta bo'lib, u nafaqat elektr tarmog'i kuchlanishining pasayishiga, balki uning barqarorligining yomonlashishiga ham olib keladi.

Shuningdek, elektr uzatish tarmoqlarida aktiv quvvat ulushi kamayadi, energiya yo'qotishlari ortadi va katta miqdorda elektr energiya isrofi yuzaga keladi [1]. Shuning uchun elektr tizimida reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish juda muhimdir – bu elektr uzatish tarmoqlaridagi reaktiv tokni kamaytirish, tizimning quvvat balansini yaxshilash, uskunalarni samaradorligini oshirish va tarmoqning barqaror ishlashini ta'minlashga xizmat qiladi. Elektr jihozlarning reaktiv quvvatga bo'lgan talabi ortib borar ekan, elektr tarmoqlarida reaktiv quvvatning taqsimlanishi yanada murakkablashmoqda, reaktiv quvvat kompensatsiyasi texnologiyalariga bo'lgan talab esa yildan-yilga oshmoqda [2]. An'anaviy uskunalarining imkoniyatlari esa hozirgi zamon talablarini to'liq qondira olish imkonini mavjud emas.

2. Materiallar va usullar (Methods and materials)

Zamonaviy elektr tizimlarida katta quvvatlarni yuqori tezlikda kompensatsiya qilish talab etilganda sinxron kompensatorlar asta-sekin parallel kondensatorlar va elektron boshqaruvli kompensatorlarga o'rin bo'shatmoqda [3]. Parallel kondensator – reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish va kuchlanishni barqarorlashtirishning eng oddiy, ishonchli va arzon usullaridan biridir. Uning tuzilishi sodda, o'rnatish, ishlash va texnik xizmat ko'rsatish qulay hamda iqtisodiy samaradorlik yuqoridir. Kondensator tomonidan beriladigan reaktiv quvvat Q_c quyidagicha ifodalanadi, ya'ni kuchlanish U doimiy bo'lganda:

$$Q_c = \frac{U^2}{X_c} \quad (1)$$

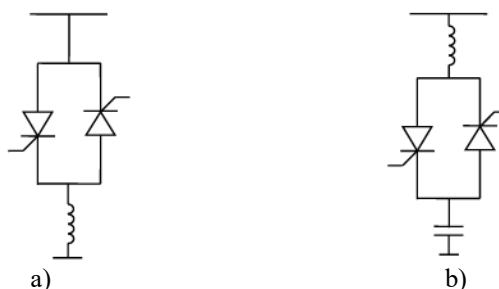
bu yerda

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (2)$$

Formulani soddalashtirsak:

$$Q_c = U^2 \omega C \quad (3)$$

(3)-ifodadan ko'rinadiki, kuchlanish pasaygan holatlarda elektr tarmog'ida reaktiv quvvat yetishmovchiligi kelib chiqadi [4]. Kuchlanishni ma'lum darajada ushlab turish uchun kondensatorning berayotgan quvvati kamayib ketadi, bu esa kompensatsiya samaradorligini pasaytiradi. Shuningdek, kondensatorlar o'zlarining o'zgarmas reaktiv quvvat berish xususiyati sababli tizim yuklamalari o'zgaruvchan bo'lgan holatlarda me'yoridan ortiq kompensatsiya yoki yetarli bo'lmagan kompensatsiya holatlarini yuzaga keltirishi mumkin. Bundan tashqari, tarmoqda garmoniklar mavjud bo'lsa, parallel rezonans hodisalari ham yuzaga keladi, bu esa garmonik toklarning yanada kuchayishiga olib keladi. Hozirgi vaqtda keng qo'llaniladigan reaktiv quvvat kompensatsiya qurilmalariga statik reaktiv quvvat kompensatori (SVC), statik reaktiv quvvat generatori (SVG) va birlashtirilgan o'zgarmas tok boshqaruv qurilmasi (UPFC) kiradi. SVC – tiristorlarni boshqarish orqali reaktorlar va kondensatorlarni tartibli ulash/ajratish tamoyiliga asoslanadi. Uning afzalliklariga yuqori tezkorligi, dinamik javobning qisqa bo'lishi, mexanik qismlarning deyarli yo'qligi, xizmat muddati uzunligi, kuchlanish tebranishlarini samarali tekislash, tizim barqarorligini ta'minlash kabi funksiyalar kiradi [5]. Shu sababli SVC elektr energiya tizimlarida reaktiv quvvatni boshqarishning eng samarali usullaridan biriga aylangan. SVC odatda tiristor bilan ulanuvchi kondensator TSC (Thyristor Switched Capacitor) elementlar kombinatsiyasidan tashkil topadi.



1-rasm. SVC tipidagi statik reaktiv quvvat kompensatori
Fig 1. SVC-type Static Reactive Power Compensator.

Tiristor orqali boshqariluvchi reaktor tipidagi statik reaktiv quvvat kompensatori 10 ms atrofida yuqori javob tezligiga ega, boshqaruv moslashuvchan, garmonikalarni yutish qobiliyati kuchli, zaryad/razryad jarayonlari yaxshi kechadi va fazoviy muvozanatni ta'minlay oladi. Biroq bir qator kamchiliklari mavjud (1-a-rasm).

TSC – bu kondensator guruhini ikkita teskari ulanma tiristor orqali tarmoqqa ulash/ajratish mumkin



bo'lgan qurilma bo'lib, tarmoq kuchlanishini real vaqt rejimida kuzatish orqali tiristorlarni aniq bir lahza ochildirish orqali reaktiv quvvat kompensatsiyasini amalga oshiradi (1-b-rasm). TSC mexanik kalitlarga nisbatan quyidagi afzalliklarga ega:

- kontaktlarning yo'qligi sababli mexanik eskirish bo'lmaydi;
- kalitlash jarayoni juda tez va aniq;
- kondensatorni tarmoqqa tok zarbasiz ulash mumkin;
- kommutatsiya momenti aniq boshqariladi;
- konstruktsiya sodda, ishonchliligi yuqori;
- energiya sarfi kam;
- garmoniklarni kuchaytirmaydi.

Elektr energiya tizimida kuchlanish bilan tok orasidagi fazalar farqi juda muhim rol o'ynaydi. Fazalar farqi qanchalik katta bo'lsa, tizimning samaradorligi shunchalik pasayadi [6]. Shu sababli muhandislik amaliyotida quvvatni quyidagicha ta'riflash qabul qilingan:

$$S = UI \quad (4)$$

Bu – to'liq quvvat.

Aktiv quvvatni to'liq quvvatga nisbatiga quvvat koeffitsienti deyiladi:

$$\lambda = P/S \quad (5)$$

(5) formuladan ko'rinadiki, agar tok va kuchlanish orasidagi faza burchagi kichik bo'lsa, quvvat koeffitsienti katta bo'ladi, bu – energiya manbaidan foydalanish samaradorligining yuqoriligini anglatadi.

Ya'ni, $\lambda \rightarrow 1$ bo'lsa – tizim juda samarali, deyarli barcha quvvat foydali ishlatilmoqda. λ kichik bo'lsa – tizimda reaktiv quvvat ortiqcha, energiya yo'qotishlari ko'p.

$\cos \varphi \rightarrow 1$ bo'lganda, manba va yuklama orasida faqat energiya almashinuvi mavjud bo'ladi. Shuning uchun, chiziqli sinusoidal elektr zanjirlarida quvvat koeffitsientining fizik ma'nosi quyidagicha ifodalanadi:

$$\lambda = \cos \varphi \quad (6)$$

P, Q va S o'rtasidagi munosabatni olamiz:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (7)$$

Formuladan (16) kelib chiqib, reaktiv quvvatning aniqlanishi quyidagicha bo'ladi:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (8)$$

Uch fazali AC tizimlarida aktiv quvvat va reaktiv quvvat mos ravishda fazaviy aktiv quvvatlar va fazaviy reaktiv quvvatlar yig'indisidir.

Oniy quvvat nazariyasi birinchi bo'lib yapon olimi H.Akagi tomonidan 1980-yillarda ilgari surilgan. Keyinchalik u oniy kuchlanish, oniy tok, oniy aktiv quvvat va oniy reaktiv quvvat tushunchalarini kengaytirdi [7]. Oniy quvvat nazariyasining maqsadi – reaktiv quvvat kompensatsiyasini tez va aniq amalga oshirish uchun reaktiv quvvatni real vaqt rejimida hisoblash muammosini hal qilishdir. Akagi H. oniy reaktiv quvvat nazariyasini uch fazali tizimlarda $\alpha - \beta$ koordinatalariga o'tish orqali ishlab chiqqan.

Olim, ABC uch fazali kuchlanish va toklarni $\alpha - \beta$ ikki fazali o'zgarmas koordinata tizimiga quyidagi o'tish matritsasi orqali olib keladi:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

Xuddi shu kabi, uch fazali toklar ham $\alpha - \beta$ koordinatalar tizimiga o'tkaziladi.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

$\alpha - \beta$ koordinatalar tizimida oniy aktiv quvvat va oniy reaktiv quvvat quyidagicha bo'ladi:

$$\begin{cases} p = \frac{3}{2}(u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta) \\ q = \frac{3}{2}(u_\alpha i_\beta - u_\beta i_\alpha) \end{cases} \quad (11)$$

Agar tizimning uch fazali toki va kuchlanishi to'liq simmetrik uch fazali sinusoidal bo'lsa, ya'ni:

(12)

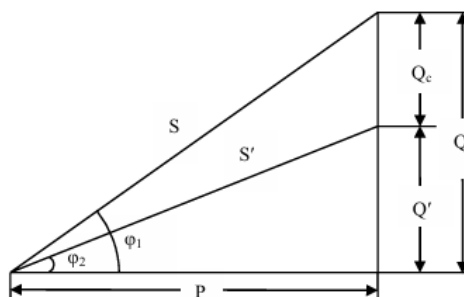
$$\begin{cases} p = \frac{3}{2}(u_{\alpha}i_{\alpha} + u_{\beta}i_{\beta}) = 3U_N I_N \cos(\varphi_u - \varphi_i) \\ q = \frac{3}{2}(u_{\alpha}i_{\beta} - u_{\beta}i_{\alpha}) = 3U_N I_N \sin(\varphi_u - \varphi_i) \end{cases} \quad (13)$$

Yuqoridagi hosil qilingan natijalardan ko'rinib turibdiki, oniy aktiv quvvat p va oniy reaktiv quvvat q qiymatlari oddiy usulda hisoblangan an'anaviy aktiv va reaktiv quvvat qiymatlariga to'liq teng bo'ladi va ular doimiy miqdorlar bo'lib qoladi. Biroq shuni ko'rish mumkinki, oniy quvvat nazariyasida faqat uch fazali kuchlanish va tokning ayni lahzadagi qiymatlarini bilish kifoya, shu orqali aktiv va reaktiv quvvatni hisoblash mumkin [8]. Bu hisoblash jarayonini ancha tezlashtiradi va real vaqt rejimida reaktiv quvvat kompensatsiyasi uchun qulay imkon yaratadi. An'anaviy nazariya esa butun bir davr bo'yicha kuchlanish va tokning integral qiymatlarini talab qiladi, bu esa hisoblashni sekinlashtiradi.

Agar tizimdagi uch fazali tok va kuchlanishlar to'liq simmetrik uch fazali sinusoidal bo'lsa, ya'ni:

$$\begin{cases} p = \frac{3}{2}(u_{\alpha}i_{\alpha} + u_{\beta}i_{\beta}) = 3U_N I_N \cos(\varphi_u - \varphi_i) \\ q = \frac{3}{2}(u_{\alpha}i_{\beta} - u_{\beta}i_{\alpha}) = 3U_N I_N \sin(\varphi_u - \varphi_i) \end{cases} \quad (14)$$

Oniy aktiv quvvat p va oniy reaktiv quvvat q oddiy usulda hisoblangan aktiv va reaktiv quvvatlarga to'liq mos keladi. Ular doimiy qiymatlar bo'lib, an'anaviy metoddagi qiymatlar bilan son jihatdan tengdir. Oniy reaktiv quvvat nazariyasida faqatgina uch fazali kuchlanish va tokning ayni lahzadagi qiymatlari kerak bo'ladi. Bu esa hisoblash vaqtini ancha qisqartiradi. Bu usul tezkor reaktiv quvvat kompensatsiyasi uchun nazariy asos yaratadi. An'anaviy nazariya esa butun bir davr bo'yicha integrallangan qiymatlar, ya'ni kuchlanish va tokning bir davr ichidagi qiymatlarini talab qiladi, bu esa hisoblashni sekinlashtiradi.



2-rasm. Reaktiv quvvat kompensatsiyasining vektor diagrammasi
Fig 2. Vector Diagram of Reactive Power Compensation.

- Q – kompensatsiyadan oldingi reaktiv quvvat;
- Q' – kompensatsiyadan keyingi reaktiv quvvat;
- Q^c – kondensatorning reaktiv quvvati (kompensatsiya miqdori);
- P – aktiv quvvat ;
- S – kompensatsiyadan oldingi to'liq quvvat;
- S' – kompensatsiyadan keyingi to'liq quvvat;
- φ_1 – kompensatsiyadan oldingi quvvat koeffitsienti burchagi;
- φ_2 – kompensatsiyadan keyingi quvvat koeffitsienti burchagi.

Aktiv quvvat P o'zgarmas deb hisoblaganda, kompensatsiya miqdori:

$$Q_c = Q - Q' \quad (15)$$

Elektr ta'minoti tomonidan chiqariladigan reaktiv quvvat Q dan Q' ga kamayadi. Kompensatsiya natijasida quvvat koeffitsienti burchagi φ_1 dan φ_2 ga qisqaradi (2-rasm), shuning uchun:

$$\cos \varphi_1 \rightarrow \cos \varphi_2$$

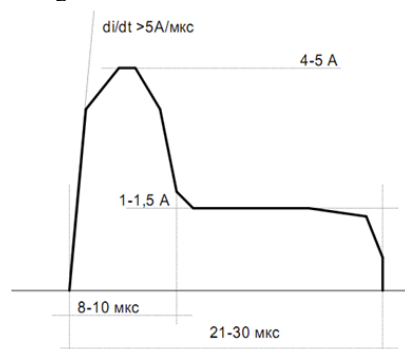
Quvvat koeffitsientining oshishi elektr energiyasi manbasining samaradorligini keskin oshiradi, elektr tarmog'idagi isroflarni esa kamaytiradi.

3. Natijalar (Results)

Reaktiv quvvat kompensatorlarida tiristorlar yuqori kuchlanish va katta tok ostida ishlaydi. Bunda tiristor yarim o'tkazgich strukturasi sezilarli darajada issiqlik ajraladi. Agar ushbu issiqlik yetarli darajada olib chiqilmasa, kristall harorati ruxsat etilgan maksimal qiymatdan oshib ketadi va qurilmaning ishdan chiqishi, ish resursining keskin kamayishi yoki avariya rejimlari yuzaga kelishi

mumkin. Shu sababli, reaktiv quvvat kompensatsiya qiluvchi qurilmalar konstruksiyasida tiristorlarning issiqlik rejimiga va sovutish tizimiga alohida e'tibor beriladi. Hozirgi vaqtda temir yo'l elektr ta'minoti tizimida qo'llaniladigan reaktiv quvvatni kompensatsiya qiluvchi qurilmalarning soz holatda ishlashining eng muhim faktolaridan biri bu sovutish tizimini ishonchlilik masalasidir.

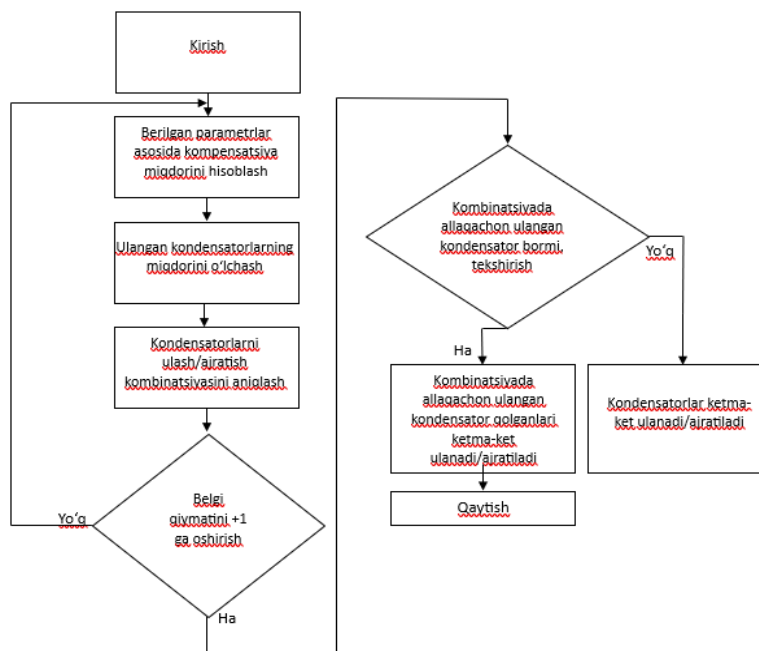
Tiristor orqali o'tadigan yuklama tokining qiymati tortuvchi nimstansiyasining kontakt tarmoq fiderlarida elektrlashtirilgan temir yo'l elektr ta'minotida 2200 A gacha yetishi mumkin, bu esa tiristorni qizishiga olib keladi, tiristorning ma'lum haroratda ushlab turish uchun suyuqlik (etiloglikolen) dan foydalaniladi. Bu suyuqlik esa ma'lum vaqt (1 yil) davomida o'z hususiyatlarini yo'qotadi, natijada kompensatsiya qurilmalarining parametrlarini buzilishiga olib kelib, qurilmaning ishlashiga relelar orqali ta'qiq qo'yiladi [9]. (suyuqlikning 10 turdagi parametrlarini o'Ichovchi relelar o'rnatilgan, hususan suyuqlik zichligiga, elektr o'tkazuvchanligiga, solishtirma qarshiligiga, haroratiga, konsratsiyasiga, bosimga ...). buzilishiga olib keladi.



3- rasm. Tiristorni ochish uchun boshqaruv elektrodiga beriluvchi tok impulsining vaqt bo'yicha grafigi

Fig 3. Time Waveform of the Gate Current Pulse Applied to Trigger the Thyristor.

Ushbu (3-rasm) blok-sxema tiristor yordamida boshqariladigan TSC tipidagi reaktiv quvvat kompensatorida kondensatorlarni ulash yoki ajratish jarayonini avtomatik boshqarish algoritmini aks ettiradi. Algoritmning asosiy maqsadi — tizimga kerakli reaktiv quvvat kompensatsiyasini ta'minlash va kondensatorlarni ortiqcha kommutatsiyalardan himoya qilishdir. Ushbu model orqali tarmoqning uch fazali tok va kuchlanishlari real vaqt rejimida kuzatilib, boshqaruv tiristorlarining ulanish/ajralish jarayonlari nazorat qilinadi. Natijada reaktiv quvvat kompensatsiyasiga erishiladi.

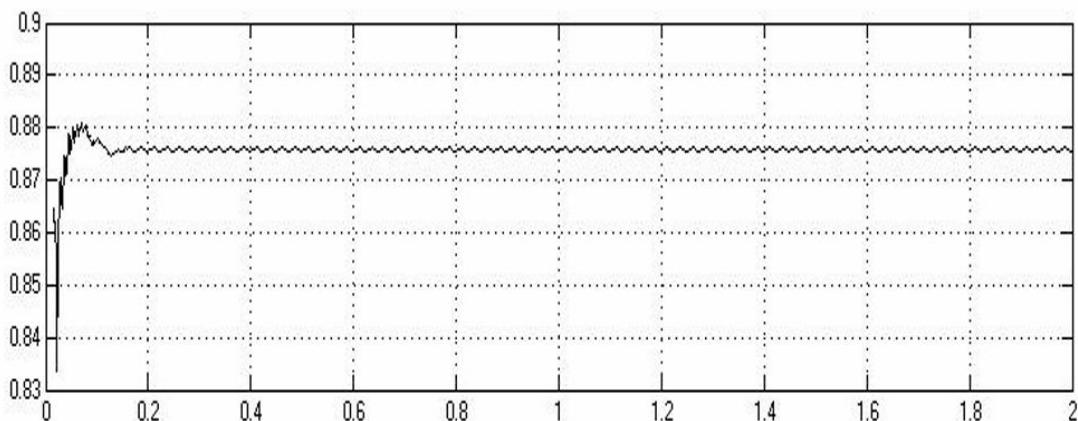


4-rasm. Tiristor orqali boshqariladigan kompensatsiyalovchi qurilmaning kondensatorini ulab/ajratish blok-sxemasi

Fig 4. Block Diagram of Connecting/Disconnecting the Capacitor in a Thyristor-Controlled Compensation Device.

Ushbu blok-sxema tiristor yordamida boshqariladigan TSC tipidagi reaktiv quvvat kompensatorida

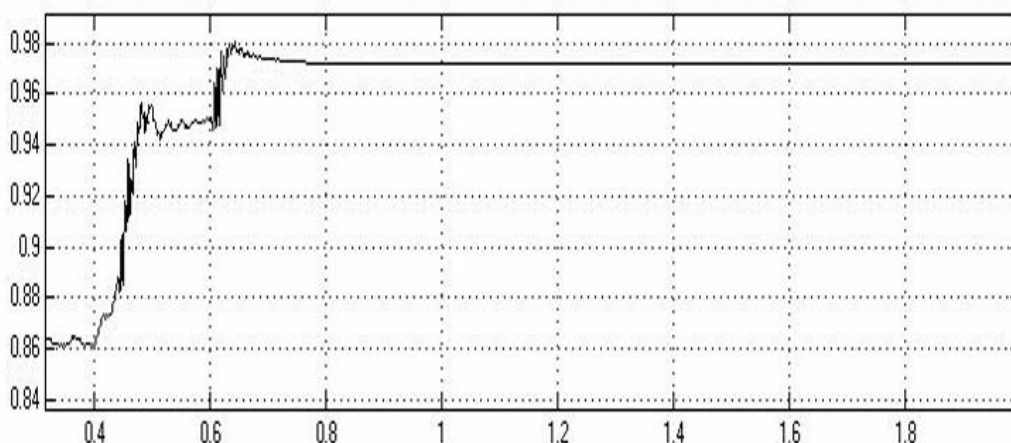
kondensatorlarni ulash yoki ajratish jarayonini avtomatik boshqarish algoritmini aks ettiradi. Algoritmning asosiy maqsadi — tizimga kerakli reaktiv quvvat kompensatsiyasini ta'minlash va kondensatorlarni ortiqcha kommutatsiyalardan himoya qilishdir. Ushbu model orqali tarmoqning uch fazali tok va kuchlanishlari real vaqt rejimida kuzatilib, boshqaruv tiristorlarining ulanish/ajralish jarayonlari nazorat qilinadi [10]. Natijada reaktiv quvvat kompensatsiyasiga erishiladi. Ushbu boshqaruv signallari TSC qurilmasidagi 12 juft tiristorlarni boshqaradi. Aynan tiristorlarning ochilishi yoki yopilishi kondensatorlarning tarmoqqa ulanish miqdorini belgilab, reaktiv quvvatning kompensatsiya darajasini ta'minlaydi.



5-rasm. Tiristor bilan boshqariluvchi kondensator tarmoqqa ulanmasdan avvalgi tizimning quvvat koeffitsienti grafigi

Fig 5. Power Factor Curve of the System Before Connection of the Thyristor-Controlled Capacitor to the Network

Modellashtirish (simulyatsiya) o'tkazilgandan so'ng, $\cos\phi$ qiymatlari orqali tahlil qilindi. 5-rasmdan ko'rinib turibdiki, TSC ulanmagan holatda tizimning quvvat koeffitsienti 0.87–0.88 oralig'ida bo'lib, elektr ta'minoti bo'limining talablariga to'liq javob bermaydi. Bu esa energiyadan foydalanish koeffitsienti pastligini bildiradi. 6-rasmga ko'ra, tizimda 0,4 sekund atrofida tiristorlarning ochilishi orqali TSC qurilmasi ulana boshlaydi va shu paytdan boshlab quvvat koeffitsienti asta-sekin oshadi. 0.6 sekunddan so'ng tizim barqarorlashib, quvvat koeffitsienti 0.96–0.98 diapazonida saqlanadi [11]. Bu qiymatlar elektr ta'minoti bo'limining reaktiv quvvat kompensatsiyasi bo'yicha qo'yilgan talablarini to'liq qondiradi hamda oldindan kutilgan natijalarga to'la mos keladi.



6-rasm. Tiristor bilan boshqariluvchi kondensator ulangandan keyingi tizimning quvvat koeffitsienti grafigi

Fig 6. Power Factor Curve of the System After Connection of the Thyristor-Controlled Capacitor

Bu esa ushbu tizimning yuqori samaradorlik bilan reaktiv quvvatni kompensatsiya qila olishini, reaktiv tokni kamaytirishini, tizimdagi yo'qotishlarni qisqartirishini va bir vaqtning o'zida tizim barqarorligini sezilarli darajada oshirishini isbotlaydi.



4. Munozara (Discussion)

Tiristorlarning ishonchli ishlashini ta'minlash uchun ularga beriluvchi boshqaruv impulslari muayyan tok va vaqt parametrlariga rioya qilgan holda shakllantirilishi lozim. Tiristorni boshqarish tok impulsining tipik shakliga bog'liq bo'lib, u boshqaruv impulsi vaqt bo'yicha qanday o'zgarishini aniq ko'rsatib beradi. Impuls boshlanishida tok juda tez o'sadi. Bu bosqich tiristorni ishonchli ravishda ochish uchun juda muhim hisoblanadi. Impuls yuqori qiymatga yetib borganda, boshqaruv toki 4–5 A atrofida bo'ladi. Maksimal tok qisqa muddatga bo'lsa ham, tiristorni ochishni ta'minlaydi. Impulsning keyingi qismida tok 1–1,5 A gacha kamayadi va 21–30 mks davomida ushlab turiladi. Bu tok tiristorni ochiq holatda ushlab turish uchun yetarli hisoblanadi. Impulsning to'liq davomiyligi taxminan 30–40 mks ni tashkil qiladi. 3-rasmda 8–10 mks vaqt oralig'ida tez o'sish qismi, 21–30 mks vaqt oralig'ida esa joriy holatni saqlash qismi ko'rsatilgan. Tiristorga berilgan boshqaruv impulsi yetarli darajadagi tokda va to'g'ri shaklda bo'lmasa, tiristor ochilmasligi yoki kechikib ochilishi mumkin, ochilgan holatda esa yopilish yoki titrash yuz berishi ehtimoli mavjud. Shu sababli tiristorni boshqarish impulsida tok qiymati, di/dt ko'rsatkichi va impulsning davomiyligi kabi parametrlar juda katta ahamiyatga ega. Ushbu talablarga rioya qilish tiristorning barqaror ishlashini hamda elektr sxemalarining ishonchli boshqarilishini ta'minlaydi.

5. Xulosa (Conclusion)

1. Reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish uchun mavjud texnik vositalar (parallel kondensatorlar, SVC, STATCOM) solishtirilib, temir yo'l elektr ta'minoti sharoitlari uchun tiristor orqali boshqariladigan kondensator asosidagi kompensatsiya tizimi eng maqbul yechim ekanligi isbotlandi. TSC qurilmasining mexanik kontaktlarsiz ishlashi, tezkor kommutatsiya imkoniyati va tok zarbasiz ulanish xususiyatlari aniq texnik ustunlik sifatida ko'rsatildi.

2. TSC qurilmasini yulduzsimon ulanish sxemasida qo'llash orqali har bir fazani alohida kompensatsiya qilish imkoniyati mavjudligi aniqlandi. Ushbu yechim uch fazali nosimmetrik yuklamalar mavjud bo'lgan temir yo'l elektr ta'minoti tizimlari uchun ayniqsa samarali ekani ilmiy asoslandi.

3. Reaktiv quvvatni aniqlash va boshqarish jarayonida Akagi tomonidan taklif etilgan oniy quvvat nazariyasi qo'llanildi. Ushbu nazariya asosida faqat kuchlanish va tokning ayni lahzadagi qiymatlaridan foydalanib, reaktiv quvvatni real vaqt rejimida aniqlash mumkinligi matematik ifodalar orqali ko'rsatildi. Bu yondashuv an'anaviy integral usullarga nisbatan hisoblash tezligini sezilarli darajada oshirishi bilan farqlanadi.

4. TSC asosidagi kompensatsiya tizimi uchun avtomatik boshqaruv algoritmi ishlab chiqildi. Algoritm tarmoq kuchlanishi va toklarini uzluksiz monitoring qilish, reaktiv quvvat ehtiyojini aniqlash hamda kondensator guruhlarini optimal ketma-ketlikda ulash/ajratishni ta'minlaydi.

5. Natijalar shuni ko'rsatdiki, TSC ulanmagan holatda tizimning quvvat koeffitsienti $\cos\varphi = 0,87-0,88$ oralig'ida bo'lgan. TSC qurilmasi ulanib, kompensatsiya jarayoni boshlangandan so'ng 0,6 soniya ichida tizim barqarorlashib, quvvat koeffitsienti $\cos\varphi = 0,96-0,98$ qiymatlariga yetdi. Bu ko'rsatkichlar elektr ta'minoti tizimlari uchun belgilangan normativ talablarga to'liq javob beradi.

6. Tadqiqot davomida tiristorlarning issiqlik rejimi va sovitish tizimining ishonchligi alohida o'rganildi. Yuqori toklar (2200 A gacha) ostida ishlovchi tiristorlarda issiqlik ajralishi qurilma ishonchligini keskin pasaytirishi aniqlandi. Shu sababli majburiy havo va suyuqlik yordamida sovitish tizimlarini to'g'ri loyihalash kompensatsiya tizimining uzluksiz va xavfsiz ishlashi uchun muhim omil ekanligi asoslab berildi.

ADABIYOTLAR

1. Miller T.J.E. Reactive Power Control in Electric Systems. John Wiley & Sons, 2012.
2. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components." IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-20, no. 3, pp. 625–630, 1984.
3. Xu W., Li Y., Liu Z. "Application of SVC and STATCOM for system dynamic performance improvement." IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005, pp. 1–6.
4. Zhang X., Rehtanz C., Pal B. Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control. Springer-Verlag, 2006.
5. Luo A., Shuai Z., Zhu W., Shen Z.J. "Combined system for harmonic suppression and reactive power compensation." IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 2, pp. 418–428, 2009.
6. Huang W., Chen Y., Wang X. "Design of thyristor cooling system for high power SVC used in electrified railway." International Conference on Power System Technology (POWERCON), IEEE,



7. O. Toirov, Sh. Azimov, Z. Najmitdinov, M. Sharipov Z. Toirov. Improvement of the cooling system of reactive power compensating devices used in railway power supply. *E3S Web of Conferences*. 497. 10.1051/e3sconf/202449701015.
8. O. Toirov, Sh. Azimov, Z. Toirov. Improving the cooling system of reactive power compensation devices used in railway power supply. *AIP Conf. Proc.* 3331, 050030 (2025). <https://doi.org/10.1063/5.0305670>
9. O. Filina, A. Khusnutdinov, O. Toirov, Kh. Vakhitov, A. Abdylina, Investigation the conditions of existence and disturbances of brush-collector contact *E3S Web Conf.* 563 01009 (2024) DOI: 10.1051/e3sconf/202456301009
10. O. Toirov, Sh. Atoev, T. Sadullayev, D. Jumaeva, Energy-saving operating modes and functional diagrams of a cotton-cleaning device based on frequency-controlled electric drives. *AIP Conference Proceedings*, 3152 (1), 030016, DOI: 10.1063/5.0218797.
11. O. Toirov, N. Pirmatov, A. Bekishev, N. Kurbanov, O. Zaynieva, U. Norkulov, Calculation of U-shaped characteristics and reactive power of synchronous compensator with longitudinal-transverse excitation, *AIP Conference Proceedings* 2552, 040020 (2022).

REFERENCES

1. Miller T.J.E. *Reactive Power Control in Electric Systems*. John Wiley & Sons, 2012.
2. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components." *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-20, no. 3, pp. 625–630, 1984.
3. Xu W., Li Y., Liu Z. "Application of SVC and STATCOM for system dynamic performance improvement." *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, 2005, pp. 1–6.
4. Zhang X., Rehtanz C., Pal B. *Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control*. Springer-Verlag, 2006.
5. Luo A., Shuai Z., Zhu W., Shen Z.J. "Combined system for harmonic suppression and reactive power compensation." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 2, pp. 418–428, 2009.
6. Huang W., Chen Y., Wang X. "Design of thyristor cooling system for high power SVC used in electrified railway." *International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, IEEE,
7. O. Toirov, Sh. Azimov, Z. Najmitdinov, M. Sharipov Z. Toirov. Improvement of the cooling system of reactive power compensating devices used in railway power supply. *E3S Web of Conferences*. 497. 10.1051/e3sconf/202449701015.
8. O. Toirov, Sh. Azimov, Z. Toirov. Improving the cooling system of reactive power compensation devices used in railway power supply. *AIP Conf. Proc.* 3331, 050030 (2025). <https://doi.org/10.1063/5.0305670>
9. O. Filina, A. Khusnutdinov, O. Toirov, Kh. Vakhitov, A. Abdylina, Investigation the conditions of existence and disturbances of brush-collector contact *E3S Web Conf.* 563 01009 (2024) DOI: 10.1051/e3sconf/202456301009
10. O. Toirov, Sh. Atoev, T. Sadullayev, D. Jumaeva, Energy-saving operating modes and functional diagrams of a cotton-cleaning device based on frequency-controlled electric drives. *AIP Conference Proceedings*, 3152 (1), 030016, DOI: 10.1063/5.0218797.
11. O. Toirov, N. Pirmatov, A. Bekishev, N. Kurbanov, O. Zaynieva, U. Norkulov, Calculation of U-shaped characteristics and reactive power of synchronous compensator with longitudinal-transverse excitation, *AIP Conference Proceedings* 2552, 040020 (2022).