



Реактив quvvatni rostdash usullari tahlili

Ikromjon U. Raxmonov¹, Shohruh M. Atajiev^{1,a}

¹ DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston ilider1987@yandex.ru <http://orcid.org/0000-0003-2076-5919>

^{1,a} Assistent Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston mr.shoh.mr@gmail.com <http://orcid.org/0000-0003-2076-5919>

Dolzarbli: Reaktiv quvvatni samarali boshqarish elektr tarmoqlarida kuchlanish barqarorligini ta'minlash, energiya yo'qotishlarini kamaytirish va uskunalarning umrini uzaytirish uchun muhimdir. Bugungi kunda tarmoq yuklamalarining dinamik o'zgaruvchanligi sababli, oddiy statsionar kompensatsiya usullari yetarli emas, shu bois avtomatlashtirilgan va moslashuvchan tizimlarga ehtiyoj ortmoqda.

Maqsad: Reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish va uni avtomatik boshqarishning zamonaviy, iqtisodiy va texnik samarador usullarini tahlil qilish, real vaqt rejimida optimal kompensatsiya yechimlarini ishlab chiqish.

Usullari: Ochiq va yopiq ta'sir zanjirli boshqaruv sxemalari, Vaqtga asoslangan boshqaruv, Kuchlanish, tok va reaktiv quvvat miqdoriga qarab boshqaruv, Fazaviy regulyatorlar (masalan, B2201) yordamida faza bo'yicha monitoring, Noelektrik (harorat, bosim) sensorlar asosidagi qo'shimcha boshqaruv tizimlari

Natijalar: Tahlil natijalariga ko'ra, avtomatik boshqaruv tizimlari orqali tarmoq kuchlanishini normallashtirish, energiya yo'qotishlarini sezilarli kamaytirish, ortiqcha yoki yetarli bo'lmagan kompensatsiyani bartaraf etish va tizimning barqarorligini oshirish mumkin. B2201 kabi regulyatorlar yordamida yuklamaga mos real vaqtli kompensatsiya ta'minlanadi.

Kalit so'zlar: Reaktiv quvvat, avtomatik kompensatsiya, kondensator batareyasi, kuchlanish boshqaruvi, ochiq va yopiq zanjir, tok relesi, B2201 regulyatori, elektr energiyasi sifati, Smart Grid, energiya samaradorligi.

Анализ методов регулирования реактивной мощности

Икромжон У. Рахмонов¹, Шохрух М. Атажиев^{1,a}

¹д.т.н., профессор, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан ilider1987@yandex.ru <http://orcid.org/0000-0003-2076-5919>

^{1,a}Ассистент, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан mr.shoh.mr@gmail.com <http://orcid.org/0000-0003-2076-5919>

For citation: Rakhmonov I.U., Atajiev Sh.M. Analysis of methods for reactive power control. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2025, no. 2, pp. 121-128.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.16941203>

Received: 18.01.2025
Revised: 23.03.2025
Accepted: 20.05.2025
Published: 27.06.2025

Copyright: © Ikrom U. Rakhmonov, Shohruh M. Atajiev, 2024. 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/>).

Актуальность: Эффективное управление реактивной мощностью имеет важное значение для обеспечения стабильности напряжения в электрических сетях, снижения потерь энергии и увеличения срока службы оборудования. В современных условиях, когда нагрузки в сетях динамически изменяются, традиционные методы стационарной компенсации становятся недостаточными, в связи с чем возрастает потребность во внедрении автоматизированных и адаптивных систем управления.

Цель: Анализ современных, экономически и технически эффективных методов автоматической компенсации реактивной мощности и разработка оптимальных решений для управления в режиме реального времени.

Методы: Структурные схемы управления с открытым и замкнутым циклом, Управление на основе времени, Управление по величине напряжения, тока и реактивной мощности, Мониторинг по фазам с использованием фазовых регуляторов (например, B2201), Дополнительные системы управления на основе неэлектрических датчиков (температуры, давления и др.)

Результаты: Анализ показывает, что с помощью автоматических систем управления можно нормализовать напряжение в сети, значительно снизить потери энергии, устранить избыточную или недостаточную компенсацию, а также повысить устойчивость системы. Использование регуляторов, таких как B2201, обеспечивает соответствующую компенсацию реактивной мощности в реальном времени в зависимости от нагрузки.

Ключевые слова: Реактивная мощность, автоматическая компенсация, батарея конденсаторов, управление напряжением, открытая и замкнутая схема, токовое реле, регулятор B2201, качество электроэнергии, интеллектуальные сети (Smart Grid), энергоэффективность.

Analysis of methods for reactive power control

Ikromjon U. Rakhmonov¹, Shohruh M. Atajiev^{1,a}

¹DSc, Professor, Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan ilider1987@yandex.ru <http://orcid.org/0000-0003-2076-5919>

^{1,a}Assistant, Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan mr.shoh.mr@gmail.com <http://orcid.org/0000-0003-2076-5919>



Relevance: Efficient management of reactive power is essential for ensuring voltage stability in power grids, reducing energy losses, and extending the lifespan of electrical equipment. Due to the dynamic nature of modern power system loads, traditional stationary compensation methods are no longer sufficient, leading to an increased need for automated and adaptive control systems.

Objective: To analyze modern, economically and technically effective methods of reactive power compensation and automatic control, and to develop optimal real-time compensation solutions.

Methods: Open-loop and closed-loop control schemes, Time-based control, Control based on voltage, current, and reactive power values, Phase-by-phase monitoring using phase regulators (e.g., B2201), Additional control systems based on non-electrical sensors (e.g., temperature, pressure)

Results: Analysis shows that using automatic control systems can normalize grid voltage, significantly reduce energy losses, eliminate over- or under-compensation, and enhance system stability. Regulators like B2201 provide real-time reactive power compensation according to load characteristics.

Keywords: Reactive power, automatic compensation, capacitor bank, voltage control, open-loop and closed-loop, current relay, B2201 regulator, power quality, Smart Grid, energy efficiency.

Reaktiv quvvatni rostdash elektr energiyasi tizimlarining samaradorligini oshirish va energiya yo'qotishlarini kamaytirish uchun muhim hisoblanadi. Reaktiv quvvat induktiv va sig'imli yuklamalar tufayli elektr tarmoqlarida paydo bo'ladi. U elektr tizimlarining samaradorligini pasaytiradi, kuchlanishning pasayishiga olib keladi va ortiqcha energiya yo'qotishlariga sabab bo'ladi. Shuning uchun reaktiv quvvatni boshqarish har bir elektr tarmog'i uchun muhim vazifa hisoblanadi. Hozirgi kunda elektr energiyasini samarali ishlatish va uzatish uchun reaktiv quvvatni boshqarishning yangi texnologiyalari zarur. An'anaviy boshqaruv usullari qulay bo'lsa-da, ularda ko'p holatlarda noaniqliklar mavjud va dinamik yuklanish sharoitida yetarlicha samarali emas. Shu sababli, zamonaviy boshqaruv usullari joriy etilmoqda.

Korxonada elektr ta'minoti tizimida reaktiv quvvat balansini optimallashtirish, kompensatsiya uskunalari (KU) turini va ularning quvvatini, shuningdek, o'rnatish joyini tanlash vazifasi minimal xarajatlar asosida hal qilinishi kerak. Reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish jarayoni nafaqat elektr energiyasining sifatini yaxshilashga, balki elektr uskunalardagi energiya yo'qotishlarini kamaytirish va ularning umumiy ishlash samaradorligini oshirishga xizmat qiluvchi muhim texnik yechimlardan biridir. Agar reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish qisman va chuqur bo'lmasa, elektr tarmog'i induktiv xarakterga ega reaktiv tok bilan yuklanadi. Aksincha, agar reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish to'liq bo'lsa va maksimal reaktiv yuk rejimiga mo'ljallangan holda doimiy ravishda KU ulanib tursa, reaktiv yuk kamaygan paytlarda reaktiv quvvatning ortiqcha kompensatsiyasi yuzaga keladi. Bu holda KU tomonidan hosil qilinadigan reaktiv quvvat elektr tarmog'iga uzatiladi va tarmoq sig'im xarakteriga ega reaktiv tok bilan yuklanadi. Natijada, tarmoqdagi kuchlanish oshadi va ruxsat etilgan chegaradan oshib ketishi mumkin. Bunday hodisalarning oldini olish uchun kompensatsiya uskunalari reaktiv quvvatni boshqaradigan qurilmalar bilan jihozlanishi kerak.

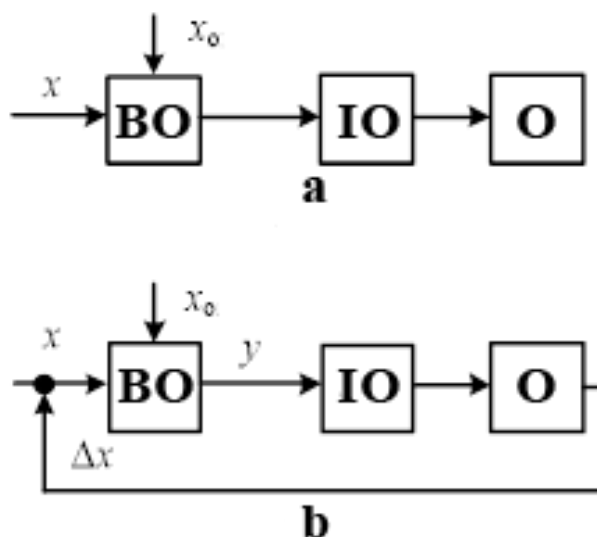
Reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish qurilmasini boshqarish quyidagi usullar orqali amalga oshiriladi:

- operator xodimlar tomonidan qo'lda boshqarish;
- o'lchov qurilmalari asosida avtomatik boshqarish.

Boshqarish parametrlari tanlanishiga qarab, KU rejimlarini avtomatlashtirish ochiq yoki yopiq ta'sir zanjiri asosida amalga oshiriladi (1-rasm).

Agar boshqaruv parametri KU quvvati o'zgarishiga sezilarli darajada bog'liq bo'lmasa yoki undan mustaqil bo'lsa, boshqaruvning tarkibiy sxemasi ochiq bo'lishi mumkin (1a-rasm). Buyruq beruvchi organ (BO) boshqaruv parametrining kirish qiymati (x) ga javob beradi va uning etalon qiymati (x_0) ga yetganda, ijro etuvchi organ (IO) orqali boshqariluvchi obyektga (O), ya'ni KU ga ta'sir ko'rsatadi. Ushbu boshqaruv usuli odatda "yoqilgan-o'chirilgan" rejimida ishlaydigan bir yoki ikki bo'limli kondensator batareyalari uchun qo'llaniladi.

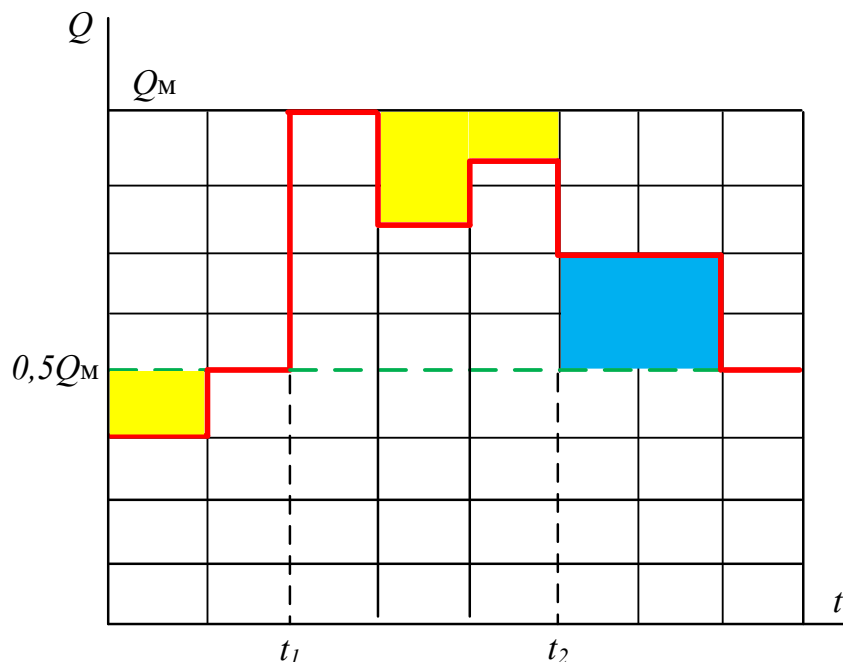
Agar boshqaruv parametri yoki parametrlarning kombinatsiyasi KU ishlash rejimiga sezilarli darajada bog'liq bo'lsa, boshqaruvning tarkibiy sxemasi yopiq ta'sir zanjiri bilan amalga oshiriladi (1b-rasm). Bu holda belgilanayotgan organ (BO) boshqaruv parametrining kirish qiymati (x) va obyekt tomonidan teskari aloqa orqali qaytarilgan qiymatni qabul qiladi. Obyektdan kelib tushgan parametrning (x) belgilangan qiymatdan (x_0) og'ishi aniqlanadi va boshqaruv jarayonida hisobga olinadi. Ushbu boshqaruv usuli sinxron dvigatellar va ko'p bo'limli kondensator batareyalari uchun qo'llaniladi. Nazorat qilinayotgan parametrni tiklash uchun boshqaruv ta'siri (y) ijro etuvchi organga uzatiladi. Bu organ kondensator batareyasi bo'limlarini ulash apparati yoki sinxron dvigatelning avtomatik uyg'otish regulyatori bo'lishi mumkin. KU quvvatining o'zgarishi boshqaruv parametrining (Δx) miqdorida o'zgarishiga olib keladi.



1-rasm. Reaktiv quvvat rejimlarini boshqarishning tarkibiy sxemasi: a - ochiq ta'sir zanjiri bilan; b - yopiq ta'sir zanjiri bilan; BO – buyruq beruvchi organ; IO - ijro etuvchi organ; O - boshqariluvchi obyekt; x - boshqaruv parametri; x_0 - boshqaruv parametrining etalon qiymati; Δx - boshqaruv parametrining o'zgarish qiymati; y - boshqaruv ta'sirining qiymati.

Fig.1. Structural diagram of reactive power regime control: a – with an open-loop control circuit; b – with a closed-loop control circuit; BO – command unit; IO – actuator; O – controlled object; x – control parameter; x_0 – reference value of the control parameter; Δx – deviation of the control parameter; y – value of the control action.

Kun davomida reaktiv yuklamani boshqarish uchun mo'ljallangan grafik reaktiv quvvatning vaqtga nisbatan o'zgarishini ko'rsatadi (2-rasm). Vertikal o'q Q reaktiv quvvatni, gorizontaal o'q t esa vaqtni ifodalaydi. Grafikda Q_m maksimal reaktiv yuklama sifatida belgilangan bo'lib, bu yuqori qizil chiziq bilan ko'rsatilgan. Shuningdek, grafikda $0.5Q_m$, ya'ni yuklamaning yarmiga teng qiymat yashil nuqtali chiziq orqali aks ettirilgan.



2-rasm. Kun davomida reaktiv quvvatni boshqarish uchun ishlatiladigan reaktiv yuklama grafigi: Q_m - maksimal reaktiv yuklama; t_1 - maksimal yuklama boshlanish vaqti; t_2 - maksimal yuklama tugash vaqti;

■ - ortiqcha kompensatsiya; ■ - yetarli darajada bo'lmagan kompensatsiya.

Fig.2. Reactive load curve used for reactive power control during the day: Q_m – maximum reactive load; t_1 – start time of maximum load; t_2 – end time of maximum load;

■ -overcompensation; ■ – undercompensation.

Grafikda maksimal yuklama davri t_1 vaqtida boshlanib, t_2 vaqtida tugaydi. Ushbu oraliqda reaktiv quvvat maksimal darajada bo'ladi. Grafikda ortiqcha kompensatsiya (sariq hudud) reaktiv quvvat talab qilinmayotgan vaqtda yuzaga keladigan energiyani ko'rsatadi. Bu holat reaktiv quvvatni boshqarishda iqtisodiy samaradorlikni pasaytiradi. Shu bilan birga, yetarli darajada bo'lmagan kompensatsiya (ko'k hudud) reaktiv quvvat talab darajasidan past bo'lgan vaqtlarda yuzaga keladi, bu esa elektr tarmog'ining samaradorligini pasaytirib, ortiqcha

yo'qotishlarga olib kelishi mumkin.

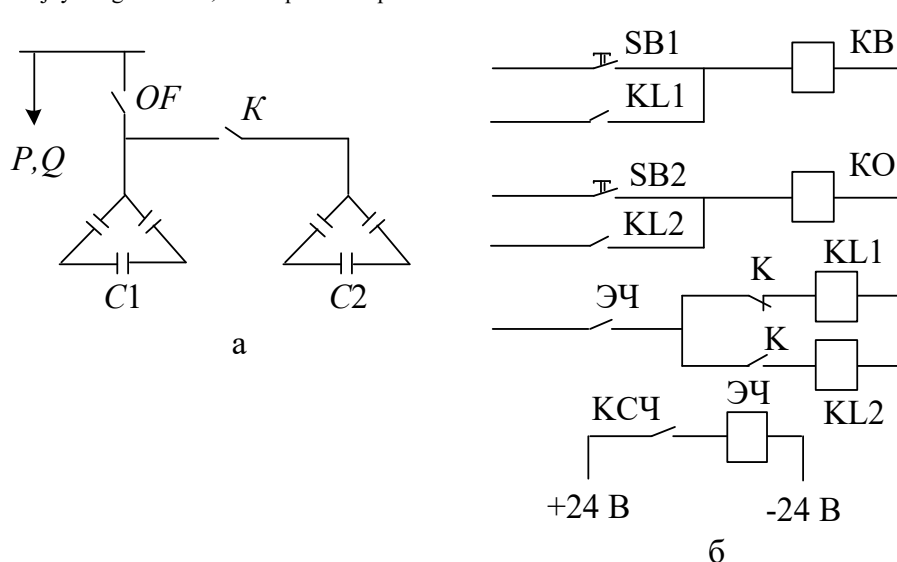
Reaktiv quvvatni samarali boshqarish uchun avtomatik boshqaruv tizimlarini joriy etish lozim. Bunday tizimlar vaqt bo'yicha reaktiv quvvatni optimallashtirish orqali elektr energiyasi sifatini va samaradorligini oshirishga yordam beradi. Grafik tahlili shuni ko'rsatadiki, reaktiv quvvatni boshqarish energiya yo'qotishlarini kamaytirish va iqtisodiy foyda olishda muhim ahamiyatga ega.

Ko'plab iste'molchilarga ega bo'lgan elektr tarmoqlarida va reaktiv quvvatning doimiy tebranish holatlarida avtomatik kompensatsiya qurilmalari doimiy ishlatiladi. Bunday qurilmalar odatda reaktiv quvvat regulyatoriga ega boshqaruv bloki va bir xil yoki turli quvvatdagi kondensator bosqichlaridan iborat bo'ladi. Ko'pchilik tizimlarda kompensatsiya bosqichma-bosqich kondensatorlar orqali amalga oshiriladi. Zamonaviy IGBT kabi kuchli yarim o'tkazgichlar yordamida silliq boshqaruv texnologik jihatdan mumkin, ammo bu yechim hozircha iqtisodiy jihatdan juda qimmat.

Reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish uskunasi KU samarali foydalanishni ta'minlash uchun avtomatik boshqaruvni joriy etish maqsadga muvofiqdir. Avtomatik boshqaruv quyidagi mezonlar asosida amalga oshirishi mumkin:

1. Kunning vaqtiga qarab boshqaruv. Kompensatsiya qilishning vaqtga bog'liq usuli reaktiv quvvatning kun davomida o'zgarishiga moslashadi. Ko'pincha, kunning ma'lum davrlarida yuklama maksimal darajaga yetadi (masalan, ish vaqtida) va boshqa vaqtlarda kamayadi (masalan, kechasi). Ushbu yondashuvda avtomatik tizimlar oldindan belgilangan vaqt oralig'ida KU ni yoqadi yoki o'chiradi. *Maksimal yuklama vaqtlari* (kunduzi yoki ishlab chiqarish vaqti) uchun to'liq kompensatsiya qilinadi. *Past yuklama davrlarida* (kechasi yoki dam olish kunlarida) quvvat talabiga mos ravishda minimal kompensatsiya amalga oshiriladi.

Reaktiv yuklama Q_n kondensator qurilmasi tomonidan ta'minlanadigan reaktiv quvvat Q_k bilan to'liq kompensatsiya qilinishi mumkin (3-rasm). Faraz qilaylik, kondensator qurilmasi bir xil quvvatli ikki seksiyadan iborat. Ulardan biri doimiy tarzda ulangan, ikkinchisi esa faqat maksimal yuklama soatlarida, ya'ni t_1-t_2 oralig'ida ulanadi. Agar bir pog'onali avtomatik boshqaruv ishlatilsa, real vaqtni qayd qiluvchi soatlar qo'llaniladi. Ushbu soatlar bir korxonaga tegishli bo'lgan bir nechta kondensator qurilmalarini, ular bir-biriga yaqin masofada joylashgan bo'lsa, bir vaqtda boshqarishi mumkin.



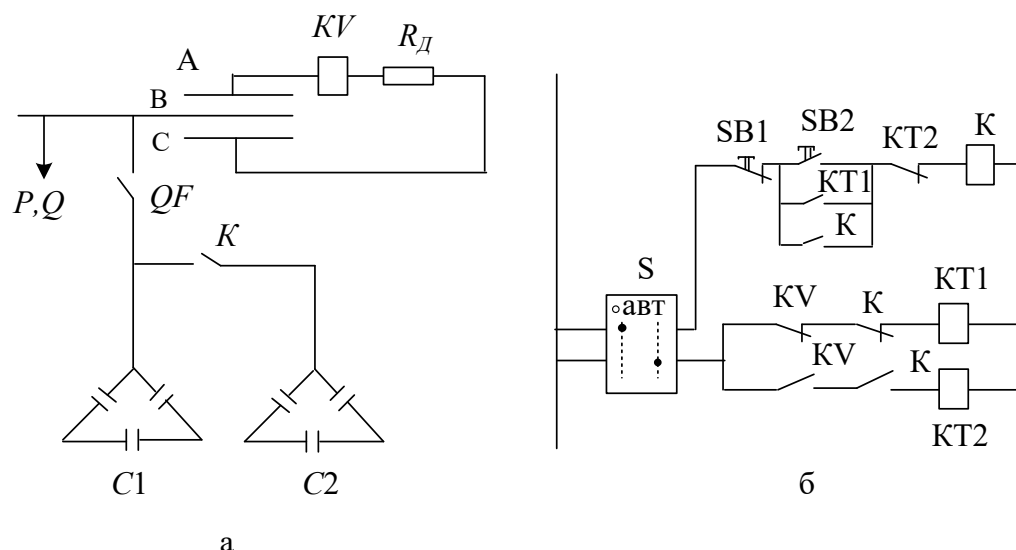
3-rasm. Kunning vaqtiga qarab kondensator batareyasining ikkinchi seksiyasini avtomatik boshqarish sxemasi: a) birlamchi ulanish sxemasi; b) boshqaruv sxemasi.

Fig.3. Automatic control scheme of the second section of the capacitor bank depending on the time of day:

a) primary connection diagram; b) control diagram.

Elektr soatlari (ЭЧ) soatlash tizimi orqali impulsli kontakt (KCЧ) yordamida ishga tushiriladi. ЭЧ kontakti yopilganda, masalan t_1 vaqtida (masalan, 07:00 da), KL1 oraliq relesi ishga tushadi va o'zining yopuvchi kontakti orqali KB ishga tushirish o'rami zanjirini yopadi. Shundan so'ng, K kontaktor kontaktlari kondensator qurilmasining ikkinchi seksiyasini ishga tushiradi. Kontaktor ishga tushgach, o'z-o'zini mahkamlovchi (fiksatsiyalovchi) holatga o'tadi, ya'ni kontaktor o'rami quvvat manbaidan uziladi. Shu bilan birga, elektr soatlarining o'rami ham kuchlanishdan ajratiladi. t_2 vaqtida, ya'ni maksimal reaktiv yuklama Q kamayganidan so'ng, ЭЧ kontakti yana yopiladi. Bu KL2 oraliq relesini ishga tushiradi, u esa o'zining yopuvchi kontakti orqali KO o'chirish o'ramini ishga tushiradi. Natijada, kontaktor o'chadi va kondensator qurilmasining ikkinchi seksiyasi tarmoqdan uziladi. K kontaktorining yordamchi kontaktlari yana o'z holatini o'zgartiradi. Mazkur sxema, shuningdek, SB1 va SB2 tugmali kalitlar yordamida kondensator qurilmasining ikkinchi seksiyasini qo'lda (manual) ulash va uzishga imkon beradi.

2. Yuklama tugunidagi kuchlanishga qarab boshqaruv. Reaktiv quvvatni boshqarishda yuklama tugunidagi kuchlanish o'zgarishi asosiy mezonlardan biri hisoblanadi. Elektr tarmog'ida kuchlanishning me'yoriy chegaralarda saqlanishi muhim. Agar kuchlanish: *Oshib ketsa*, avtomatik boshqaruv tizimi KU orqali ortiqcha reaktiv quvvatni kamaytiradi. *Pasayib ketsa*, KU orqali kerakli reaktiv quvvatni oshirib, kuchlanishning me'yoriy darajaga yetishini ta'minlaydi. Bu yondashuv kuchlanishning barqarorligini saqlash va tarmoq samaradorligini oshirish uchun qo'llaniladi (4-rasm).



4-rasm. Kuchlanish bo'yicha reaktiv quvvatni avtomatik boshqarish sxemasi: a) birlamchi ulanish sxemasi; b) boshqaruv sxemasi.

Fig.4. Automatic reactive power control scheme based on voltage: a) primary connection diagram; b) control diagram.

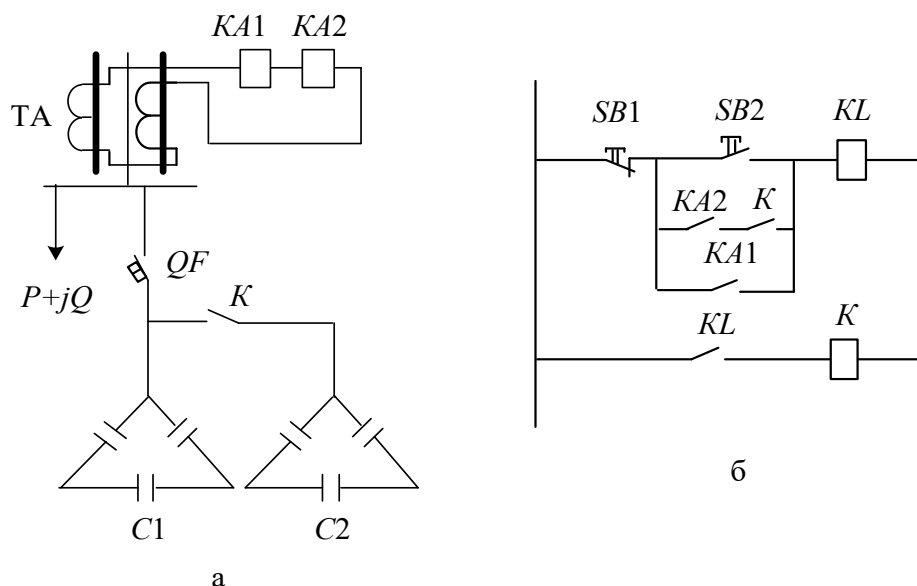
Bunday boshqaruv tizimi odatda tarmoqdagi kuchlanish rejimi asosan reaktiv yuklamalar holati bilan belgilanadigan holatlarda qo'llaniladi. Bunday vaziyatlarda reaktiv quvvat va kuchlanishni birgalikda boshqarish talab etiladi. Kondensator qurilmasining (KQ) ulanish nuqtasidagi kuchlanish nafaqat ushbu nuqtadan ta'minlanayotgan yuklamaga, balki elektr ta'minot tugunidagi boshqa iste'molchilarning yuklamalariga ham, shuningdek energiya tizimi yoki korxonaning bosh podstansiyasida amalga oshirilayotgan kuchlanishni boshqarish tadbirlariga ham bog'liq bo'ladi.

Kondensator qurilmasining quvvatini boshqarishda, quyidagi holatni hisobga olish muhim: reaktiv yuklama o'zgarishida KQ quvvatining oshishi tarmoq kuchlanishini oshiradi, aksincha quvvat kamayganda kuchlanish pasayadi. KV – bu minimal kuchlanish relesi bo'lib, yuklama tugunining shinalariga bevosita yoki kuchlanish transformatori orqali ulanadi. Zarurat tug'ilganda relega qo'shimcha qarshilik R_D orqali ulanish ham qo'llanilishi mumkin. Agar tarmoqdagi kuchlanish belgilangan chegaradan pastlasa, KV relesi ishga tushadi (bo'shshadi) va KV kontakti vaqt relesi KT1 ning o'rami zanjirini yopadi (KT1 ilgari ish holatida bu kontakti ochiq tutgan). KT1 relesi, 2–3 daqiqalik vaqt kechikishi bilan K kontaktorning o'ramiga uzluksiz kuchlanish beradi va avtomatik tarzda kondensator qurilmasining qo'shimcha seksiyasi C2 ni tarmoqqa ulaydi. Natijada generatsiya qilinayotgan reaktiv quvvat ortadi, va tarmoqdagi kuchlanish ko'tariladi. Reaktiv yuklama pasayganida esa tarmoq kuchlanishi yana oshadi va hatto belgilangan yuqori chegaradan ortib ketishi mumkin. Bunday holatda KV kuchlanish relesi yana ishga tushadi (tortiladi) va KT2 vaqt relesining o'rami zanjirini yopadi. KT2, 2–3 daqiqalik kechikishdan so'ng o'zining kontaktini uzadi va K kontaktorni o'chirib, kondensator qurilmasining qo'shimcha seksiyasini tarmoqdan uzadi. Bu vaqt kechikishi tarmoqdagi tasodifiy va jisqa muqadlatli kuchlanish tebranishlaridan himoyalani uchun zarurdir. Mazkur sxema, shuningdek, SB1 va SB2 tugmali kalitlar yordamida reaktiv quvvat rejimini qo'lda boshqarish imkonini ham beradi. Avtomatik va qo'lda boshqaruv rejimlari o'rtasida S kaliti orqali tanlov amalga oshiriladi.

3. Yuklama tokiga qarab boshqaruv. Reaktiv quvvat talabining o'zgarishi yuklama tarmog'ida oqayotgan tok miqdoriga bog'liq. Tokning o'zgarishi asosida avtomatik boshqaruv tizimi KU ni mos ravishda boshqaradi: **Yuklama tokining ko'payishi** bilan kompensatsiya qilish kuchaytiriladi, bu yuklama oqimini kamaytirishga yordam beradi. **Yuklama tokining kamayishi** bilan esa kompensatsiya kamaytiriladi, bu tarmoqda ortiqcha kompensatsiyadan qochish imkonini beradi. Bu usul yuklama tarmog'i holatini doimiy nazorat qilish orqali quvvat samaradorligini oshiradi.

Agar sutka davomida yuklama keskin o'zgarib tursa, kondensator qurilmasi (KQ) quvvatini iste'mol qilina-yotgan tok bo'yicha o'zgartirish maqsadga muvofiq bo'ladi. Yuklama tokiga qarab bir pog'onali avtomatik boshqaruv tizimini ikkita elektromagnit tok relesi – KA1 va KA2 yordamida amalga oshirish mumkin (5-rasm). Ushbu relelardan biri — yuklama oshganida ulashni, ikkinchisi esa — yuklama kamayganida uzishni ta'minlaydi.

Tok relesining sozlanma (ustavka) qiymatlari har xil tok darajalariga moslab sozlanadi. Masalan, KA1 — 5 A, KA2 — 3 A qiymatiga sozlanadi. Kichik yuklama holatida kondensator qurilmasining qo'shimcha seksiyasi o'chirilgan bo'ladi: garchi KA2 relesi ishga tushgan va uning yopuvchi kontaktlari ulangan bo'lsa-da, kontaktor K ning yopuvchi kontaktlari hali ochiq holatda bo'ladi. Yuklama ortib, tok 5 A ga yetganda KA1 relesi faol-lashadi. Bu esa KL oraliq relesini ishga tushiradi va u o'zining kontaktlari orqali K kontaktorni yoqadi, natijada kondensator qurilmasining ikkinchi seksiyasi tarmoqqa ulanadi. Aksincha, tok kamayganda avval KA1 relesi o'chadi va uning kontaktlari uziladi, biroq KL oraliq relesi hali o'chmaydi, chunki KA2 va K kontaktlari hali yopiq holatda qoladi. Faqat tok 3 A dan kam bo'lganda, KA2 relesi o'z kontaktlarini uzadi va shu orqali KL relesi zanjirini ochib, K kontaktorni o'chiradi. Natijada, ikkinchi seksiyadagi kondensator qurilmasi tarmoqdan uziladi. Mazkur sxema kondensator qurilmasining ish rejimini qo'lda boshqarishga ham imkon yaratadi.

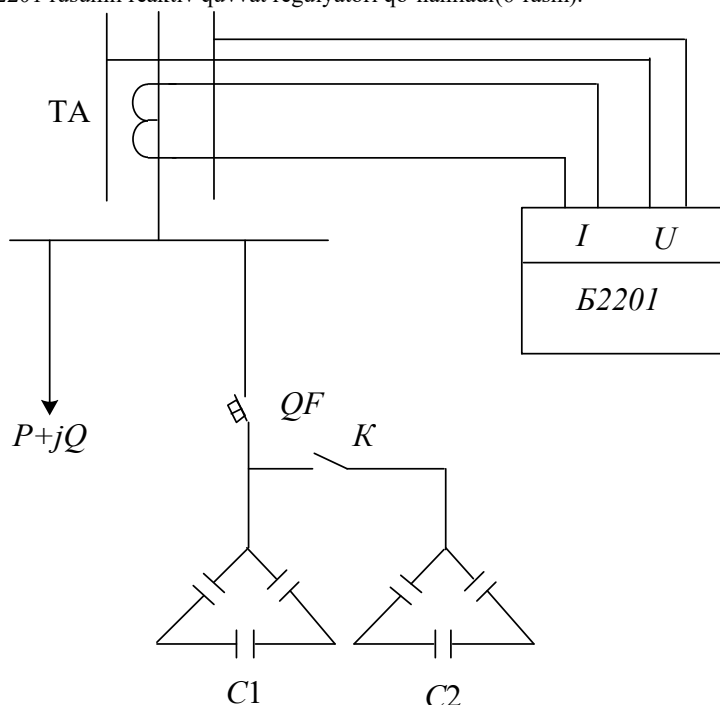


5-rasm. Tok bo'yicha reaktiv quvvatni avtomatik boshqarish sxemasi: a) birlamchi ulanish sxemasi; b) boshqaruv sxemasi.

Fig.5. Automatic reactive power control scheme based on current: a) primary connection diagram; b) control diagram.

4. Reaktiv quvvatning miqdori va xususiyatiga qarab boshqaruv. Reaktiv quvvatning miqdori va turi (induktiv yoki sig'im) tarmoqdagi KU ni boshqarishda hal qiluvchi omil hisoblanadi. Avtomatik boshqaruv tizimi: *Induktiv xarakterdagi reaktiv quvvatni sig'imi quvvat bilan muvozanatlashtiradi. Sig'im xarakterdagi reaktiv quvvatni induktiv quvvat bilan muvozanatlashtiradi.* Bunda tizim real vaqtda reaktiv quvvatni o'lchab, KU ishlashini muvofiqlashtiradi. Ushbu yondashuv elektr energiyasi sifatini yaxshilash va yo'qotishlarni kamaytirishga xizmat qiladi.

Elektr tarmog'idagi yuklama doimiy ravishda o'zgarib turadi va bu o'zgarish, avvalo, uning reaktiv tarkibiy qismida aks etadi. Reaktiv quvvatga bog'liq ravishda kondensator qurilmasining ish rejimini avtomatik boshqarish uchun B2201 rusumli reaktiv quvvat regulyatori qo'llaniladi(6-rasm).



6-rasm. Reaktiv quvvatni B2201 regulyatori yordamida boshqarish sxemasi: $P + jQ$ – faol-induktiv yuklama, C1, C2 – kondensator batareyasining seksiyalari, QF – avtomatik o'chirgich, K – kontaktorning kontakti TA – tok transformatori, I, U – tok (tok transformatoridan) va kuchlanish (tarmoqdan olinadigan) signal.

Fig.6. Reactive power control scheme using the B2201 regulator: $P + jQ$ – active-inductive load; C1, C2 – sections of the capacitor bank; QF – automatic circuit breaker; K – contactor contact; TA – current transformer; I, U – current (from the current transformer) and voltage (taken from the network) signals.



Regulyator ikki kirish kanaliga ega: birinchisiga bir fazaning toki (masalan, B fazasi), ikkinchisiga qolgan ikki faza orasidagi chiziqli kuchlanish uzatiladi. Nazorat qilinadigan fazaviy reaktiv quvvat quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$Q_{\phi} = I_B U_{AC} \cos(90 - \varphi) = I_B U_{AC} \sin\varphi,$$

bu yerda Q_{ϕ} — fazadagi reaktiv quvvat, I_B — fazaning toki, U_{AC} — boshqa ikki faza orasidagi chiziqli kuchlanish, φ — tok bilan kuchlanish orasidagi faza siljish burchagi.

Regulyator shuningdek, kondensator qurilmasi bosqichlarining keraksiz va tez-tez ulanib-o'chishini oldini olish maqsadida, sezuvchanlik zonasining sozlama indikatoriga ega. Regulyatorning ishga tushish vaqti, ya'ni kechikish vaqti, real reaktiv quvvat iste'moli bilan oldindan belgilangan (maqsadli) qiymat o'rtasidagi farq miqdoriga bog'liq. Farq qanchalik katta bo'lsa, regulyator shunchalik tez ishlaydi va reaktiv quvvat rejimi tezroq barqarorlashadi. Noto'g'ri yuklangan (asimmetrik) elektr zanjirlarda oldin yuklamani simmetriklashtirib, keyin reaktiv quvvatni kompensatsiya qiluvchi maxsus reaktiv quvvat regulyatori qo'llanilishi mumkin. Bunday regulyatorlarda uchta kirish jufti mavjud bo'lib, har bir kirishga tegishli fazaning chiziqli toki va qolgan ikki faza orasidagi chiziqli kuchlanish uzatiladi. Bu har bir fazadagi reaktiv quvvat o'zgarishini alohida kuzatish imkonini beradi. Kondensator qurilmasi har bir faza uchun ikki dona bir fazali seksiyaga, shuningdek, oltitagacha uch fazali seksiyalarga ega bo'lishi mumkin. Regulyator tarkibida eng ko'p reaktiv yuklama kuzatilayotgan fazani aniqlovchi faza tanlash bloki mavjud. Shu fazaga mos ravishda birinchi bir fazali seksiyani ulash amalga oshiriladi. Agar yuklama simmetriyasi tiklanmasa, ikkinchi bir fazali seksiya ham ulanadi. Yuklama kamayganda ushbu seksiyalar avtomatik tarzda uziladi. Agar tarmoqning uch fazasida ham reaktiv quvvat ortsa, uch fazali seksiyalar ketma-ket ulana boshlaydi. Reaktiv yuklama kamayganda esa ular avtomatik tarzda navbati bilan uziladi.

5. Noelektrik datchiklar asosida boshqaruv. Noelektrik datchiklar yuklama holatini bilvosita kuzatishga yordam beradi. Ushbu datchiklar quyidagilar bo'lishi mumkin. *Harorat datchiklari:* Elektr uskunalarining harorati yuklama darajasiga bog'liq bo'lib, bu orqali kompensatsiya zarurati aniqlanadi. *Bosim datchiklari:* Ayrim elektr tizimlarida bosim ham yuklamaning oshishi yoki kamayishini ko'rsatishi mumkin. *Tayanch va xavfsizlik datchiklari:* Og'ir yuklama yoki avariya holatlarida tarmoqni himoya qilish uchun KU avtomatik ravishda faollashadi yoki o'chiriladi.

Xulosa. Reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish va uni samarali boshqarish bugungi elektr energetika tizimlarining barqarorligi va iqtisodiy samaradorligini ta'minlashda muhim texnik vosita sifatida qaralmoqda. Tahlillar shuni ko'rsatadiki, tarmoq yuklamalari dinamik o'zgarib turadigan real sharoitlarda oddiy kondensator bloklari orqali amalga oshiriladigan stasionar kompensatsiya yetarli natija bermaydi. Ushbu muammo avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimlari yordamida hal qilinmoqda. Bunda, reaktiv quvvat miqdori, uning xususiyati (induktiv yoki sig'imli), yuklama toki, tarmoq kuchlanishi va vaqt parametrlariga asoslangan integratsiyalashgan boshqaruv mexanizmlari joriy etilishi zarur.

Xususan, reaktiv quvvatni avtomatik boshqarish tizimlari ochiq va yopiq ta'sir zanjiri asosida, real vaqt monitoringi va tezkor moslashuv imkoniyatlari bilan ajralib turadi. Bu esa nafaqat tarmoq kuchlanishini me'yoriy diapazonda ushlab turish, balki energiya yo'qotishlarini kamaytirish, tarmoqdagi barqarorlikni oshirish va uskunalarining xizmat muddatini uzaytirishga xizmat qiladi. Grafik tahlil ham shuni tasdiqlaydiki, optimal kompensatsiya rejimi elektr tarmog'ining har bir vaqt nuqtasida yuklama xususiyatlariga mos kelgan holda qurilishi kerak.

Amaliyotda keng qo'llanilayotgan avtomatik regulyatorlar, masalan B2201 rsumli qurilma, fazaviy tok va kuchlanish o'lchovlari asosida har bir fazaning reaktiv yuklamasini mustaqil baholab, mos kompensatsiya choralarini ko'radi. Shu bilan birga, noelektrik datchiklar asosida yuritiladigan qo'shimcha boshqaruv tizimlari – masalan harorat, bosim yoki xavfsizlik sensorlari – ishlab chiqarish muhiti bilan moslashtirilgan yechimlarni yaratish imkonini beradi.

Shu sababli, reaktiv quvvatni avtomatik boshqarish texnologiyalari kelajakda elektr ta'minot tizimlarini raqamlashtirish, aqlli tarmoqlar (Smart Grid) bilan integratsiyalash hamda energiya samaradorligini oshirish sohasida ustuvor yo'nalishlardan biri sifatida qaralmoqda. Har bir elektr tarmog'i uchun individual optimallashtirilgan boshqaruv modeli ishlab chiqilishi lozim bo'lib, bu yondashuv yirik korxonalar va sanoat tarmoqlarida maksimal iqtisodiy foyda va barqaror energiya ta'minotini kafolatlaydi.

ADABIYOTLAR

- Hyla P., Latko B. Advanced Static Var Generator in the Reactive Power Automatic Compensation System of an Underground Mine with a Thyristor Hoisting Machine // *Energies*, 2024, 17(15), 3628. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17153628>
- Tabatabaei N.M., Aghbolaghi A.J., Bizon N. Reactive Power Control in AC Power Systems: Fundamentals. – Cham: Springer Nature, 2020. – 781 p. DOI: 10.1007/978-3-030-50986-0. ISBN: 978-3-030-50985-3.
- Tariq M., Zaheer H., Mahmood T. Modeling and Analysis of STATCOM for Renewable Energy Farm to Improve Power Quality and Reactive Power Compensation // *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, 2021.
- Goldman C., Reid M., Levy R., Silverstein A. National Action Plan for Energy Efficiency: Coordination of Energy Efficiency and Demand Response // *U.S. Environmental Protection Agency (EPA)*, 2010.
- Аллаев К.П. Электроэнергетика Узбекистана и мира. – Ташкент: Фан ва технология, 2009.
- Аллаев К.П. Современная энергетика и перспективы её развития / Под ред. Салимова А.У. – Т.: Фан ва технологиялар, 2021.
- Закон Республики Узбекистан № ЗРУ-939 «Об электроэнергетике» от 07.08.2024 г.



8. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан № 204 «О дополнительных мерах по внедрению рыночных механизмов в топливно-энергетической сфере» от 16.04.2024 г.
9. Chappells H., Taylor V. (eds.) *Energizing the Spaces of Everyday Life: Learning from the Past for a Sustainable Future* // *RCC Perspectives*, 2019, №2. DOI: [10.5282/rcc/8735](https://doi.org/10.5282/rcc/8735).
10. Santos V.S. Comparison of Reactive Power Compensation Methods in an Industrial Electrical System with Power Quality Problems // *Academia.edu*, 2023. URL: <https://www.academia.edu/123506575>.

REFERENCES

1. Hyla, P., Latko, B. Advanced Static Var Generator in the Reactive Power Automatic Compensation System of an Underground Mine with a Thyristor Hoisting Machine. *Energies*, 2024, 17(15), 3628. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17153628>.
2. Tabatabaei, N.M., Aghbolaghi, A.J., Bizon, N. *Reactive Power Control in AC Power Systems: Fundamentals*. Cham: Springer Nature, 2020. – 781 p. DOI: 10.1007/978-3-030-50986-0. ISBN: 978-3-030-50985-3.
3. Tariq, M., Zaheer, H., Mahmood, T. Modeling and Analysis of STATCOM for Renewable Energy Farm to Improve Power Quality and Reactive Power Compensation. *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, 2021.
4. Goldman, C., Reid, M., Levy, R., Silverstein, A. *National Action Plan for Energy Efficiency: Coordination of Energy Efficiency and Demand Response*. U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2010.
5. Allaev, K.R. *Electric Power Industry of Uzbekistan and the World*. Tashkent: Fan va Texnologiya, 2009.
6. Allaev, K.R. *Modern Energy and Prospects for Its Development*. Edited by Salimov A.U. Tashkent: Fan va Texnologiyalar, 2021.
7. Law of the Republic of Uzbekistan No. ZRU-939 “On Electric Power Industry” dated 07.08.2024.
8. Resolution of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan No. 204 “On Additional Measures for the Introduction of Market Mechanisms in the Fuel and Energy Sector” dated 16.04.2024.
9. Chappells, H., Taylor, V. (eds.) *Energizing the Spaces of Everyday Life: Learning from the Past for a Sustainable Future*. RCC Perspectives, 2019, No. 2. DOI: 10.5282/rcc/8735.
10. Santos, V.S. Comparison of Reactive Power Compensation Methods in an Industrial Electrical System with Power Quality Problems. *Academia.edu*, 2023. URL: <https://www.academia.edu/123506575>.