REAKTIV QUVVATNI BOSHQARISHDA MATEMATIK MODELLASHTIRISH ASOSLARI

I.U. Raxmonov
I.A. Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti,
Sh.M. Atajiyev
I.A. Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti,
L.A. Nematov
Buxoro davlat texnika universiteti

Annotatsiya: Mazkur maqolada elektr energiya tizimlarida reaktiv quvvatning ahamiyati va uni boshqarishdagi matematik modellashtirish yondashuvlari tahlil qilingan. Tadqiqotda reaktiv quvvatning ortiqcha miqdori elektr tarmoqlarida kuchlanish pasayishi, qo‘shimcha yo‘qotishlar va quvvat koeffitsientining pasayishiga olib kelishi aniq ko‘rsatib berilgan. Ushbu muammoni bartaraf etish uchun kompensatsiya usullari, jumladan kondensator bankalari, sinxron kompensatorlar hamda zamonaviy avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimlaridan foydalanishning afzalliklari asoslab berilgan. Maqolada MATLAB/Simulink muhiti asosida qurilgan model yordamida reaktiv quvvatning hisoblanishi, apparent, aktiv va reaktiv quvvatlar o‘rtasidagi bog‘lanishlar, quvvat koeffitsientining o‘zgarishi va kompensatsiya jarayonining samaradorligi bosqichma-bosqich izohlangan. Simulyatsiya natijalari asosida kondensator sig‘imini tanlash, reaktiv quvvatni kamaytirish, yo‘qotishlarni qisqartirish va quvvat koeffitsientini me’yoriy qiymatga yaqinlashtirish mexanizmlari ko‘rsatib berilgan. Olingan natijalar elektr tarmoqlarida energiya samaradorligini oshirish, energiya isroflarini kamaytirish va tarmoqning barqaror ishlashini ta’minlashda matematik modellashtirishning amaliy ahamiyatini tasdiqlaydi.

Kalit so‘zlar: reaktiv quvvat, quvvat koeffitsienti, avtomatik kompensatsiya, matematik modellashtirish, Simulink, energiya samaradorligi, kondensator bankasi, elektr tarmoqlari.

Аннотация: В данной статье проанализировано значение реактивной мощности в системах электроснабжения и подходы математического моделирования при её управлении. В исследовании показано, что избыток реактивной мощности вызывает падение напряжения в электрических сетях, дополнительные потери и снижение коэффициента мощности. Для решения этой проблемы обоснованы методы компенсации, включая батареи конденсаторов, синхронные компенсаторы и современные автоматизированные системы управления. На основе модели MATLAB/Simulink поэтапно объяснены процессы расчёта реактивной мощности, взаимосвязи между полной, активной и реактивной мощностью, изменения коэффициента мощности и эффективность процесса компенсации.

ISSN 3030-3907

На основании результатов моделирования показаны выбор ёмкости конденсаторов, снижение реактивной мощности, минимизация потерь и достижение нормативного коэффициента мощности. Полученные результаты подтверждают практическую значимость математического моделирования для повышения энергоэффективности, снижения потерь и обеспечения стабильной работы электрических сетей.

Ключевые слова: реактивная мощность, коэффициент мощности, автоматическая компенсация, математическое моделирование, Simulink, энергоэффективность, батарея конденсаторов, электрические сети.

Abstract: This article analyzes the significance of reactive power in electrical energy systems and the approaches of mathematical modeling in its control. The study demonstrates that excessive reactive power leads to voltage drops in power networks, additional losses, and a decrease in the power factor. To solve this problem, compensation methods, including capacitor banks, synchronous compensators, and modern automated control systems, are substantiated. Using a MATLAB/Simulink model, the processes of calculating reactive power, the interrelationships between apparent, active, and reactive powers, variations in the power factor, and the efficiency of the compensation process are explained step by step. Based on simulation results, the selection of capacitor capacity, reduction of reactive power, loss minimization, and achieving the nominal power factor have been demonstrated. The results confirm the practical significance of mathematical modeling in enhancing energy efficiency, reducing losses, and ensuring stable operation of power networks.

Keywords: reactive power, power factor, automatic compensation, mathematical modeling, Simulink, energy efficiency, capacitor bank, power networks.

Kirish

Elektr energiya tizimlarida quvvat iste’moli ikki asosiy tarkibga ega: aktiv quvvat (P) va reaktiv quvvat (Q). Aktiv quvvat foydali ish bajaradi, reaktiv quvvat esa elektromagnit maydonlarni hosil qilish uchun zarur. Reaktiv quvvatning mavjudligi tarmoqdagi kuchlanish pasayishiga, yo‘qotishlarning ortishiga, va quvvat koeffitsientining pasayishiga olib keladi.

Zamonaviy sanoat korxonalarida energiya tejash siyosati doirasida reaktiv quvvatni avtomatik boshqarish tizimlari (APFC) keng qo‘llanilmoqda. Ushbu tizimlarning samarali ishlashi uchun matematik model yaratish zarur bo‘lib, u elektr yuklamalarining o‘zgarishiga real vaqt rejimida javob berish imkonini beradi.

Elektr ta’minot tizimi yuklanishi to‘la quvvat bilan aniqlanadi: $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ uning aktiv tashkil qiluvchisi P iste’mol qilingani foydali hisoblanadi va ta’minot manbaga qaytib kelmaydi. Reaktiv tashkil qiluvchisi elektr tarmoq

ISSN 3030-3907

elementlarida magnitli va elektr maydonlar tashkil qilish uchun. U amalda iste'mol qilinmaydi, ammo ta'minot manbadan (generatordan) elektr iste'molchiga va teskari oqib o'tadi. Elektr ta'minot tarmoq transformatorlari va liniyalar orqali ko'p miqdordagi reaktiv quvvatni uzatish elektr ta'minot tizimi barcha elementlarida ularning reaktiv quvvat bilan yuklanganligi shartiga ko'ra qo'shimcha aktiv quvvat isrofi paydo bo'ladi. Elektr ta'minot tiziimda aktiv va reaktiv quvvatlarni iste'molchilarga uzatishda aktiv quvvat isrofi paydo bo'ladi:

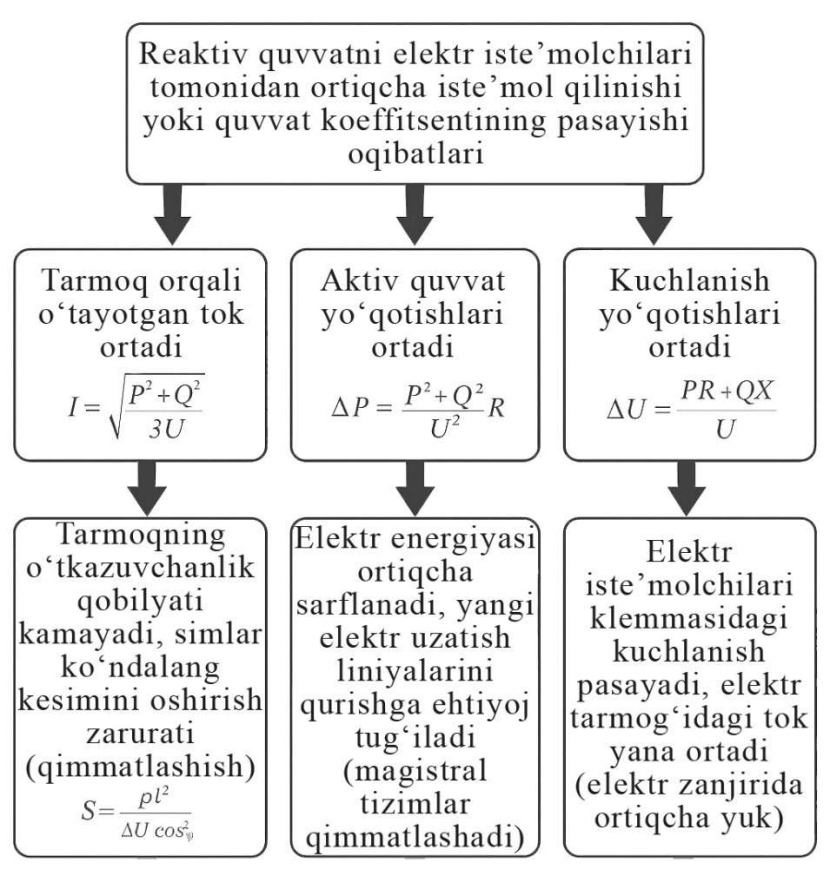
$$\Delta P = 3I^2R = 3\left(\frac{S}{\sqrt{3}U}\right)^2 R = \frac{S^2}{U^2}R = \frac{P^2+Q^2}{U^2}R = \frac{P^2R}{U^2} + \frac{Q^2R}{U^2} = \Delta P_A + \Delta P_Q$$

bu yerda birinchi bo'g'ini – aktiv quvvatni elektr zanjiri bo'ylab uzatish hisobiga aktiv quvvat isrofi, ikkinchisi – shu zanjir orqali reaktiv quvvatni uzatish hisobiga aktiv quvvat isrofi. Shunday qilib, qo'shimcha aktiv quvvat isrofi, kompensatsiya qilinmagan reaktiv quvvat uning kvadratiga proporsionalligi bilan bog'liq:

$$\Delta P_Q = \frac{Q^2R}{U^2}, \qquad R = \rho\frac{l}{S}$$

ΔP_Q-isrofi o'tkazgichlar aktiv qarshiliklariga ham proporsional va $\boldsymbol{\rho}$ - o'tkazgich materiallarning solishtirma qarshiligi, l va S – mos ravishda ularning uzunligi va ko'ndalang kesimiga ham bog'liq. Reaktiv quvvat kompensatsiyasi, yuklama ingichka simli uzun alyumin kabelga ulanganida yanada dolzarb. Agar yuklama bir xil bo'lmagan o'tkazgichlarga ulanishini hisobga olinsa, ya'ni har xil qirqimlardan tashkil topgan bo'lsa, zanjirda kommutatsiya va himoya apparatlari bor, u holda aktiv qarshilik nisbatan yanada yuqori bo'ladi.

ISSN 3030-3907



1-rasm. Reaktiv quvvatni ortiqcha iste'moli oqibatlari.

Elektr energiyani ta'minot manbadan iste'molchiga uzatishda quvvat koeffisienti katta ahamiyatga ega. Koeffisient quvvati quyidagiga teng:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}},$$

Matematik ifodalar shuni ko'rsatadiki, quvvat koeffitsientining qiymati elektr energiyani samarali uzatish va iste'molchilarga yetkazishda asosiy ko'rsatkichlardan biri hisoblanadi. Agar cosφ 1 ga yaqin bo'lsa, demak, tarmoqda aktiv quvvatning ulushi yuqori, reaktiv quvvatning esa ta'siri minimal bo'ladi. Aksincha, cosφ pasayganda, tarmoqdagi reaktiv quvvatning miqdori ortadi, natijada kuchlanish yo'qotishlari, tokning ortishi va qo'shimcha issiqlik isroflari yuzaga keladi. Shu sababli elektr ta'minot tizimida quvvat koeffitsientini yuqori darajada ushlab turish uchun kompensatsiya usullaridan keng foydalaniladi. Kondensator bankalari, sinxron kompensatorlar yoki zamonaviy avtomatik boshqaruv tizimlari yordamida cosφ ni optimallashtirish nafaqat energiya samaradorligini oshiradi, balki elektr jihozlari va tarmoqlarining xizmat muddatini ham uzaytiradi (1-rasm).

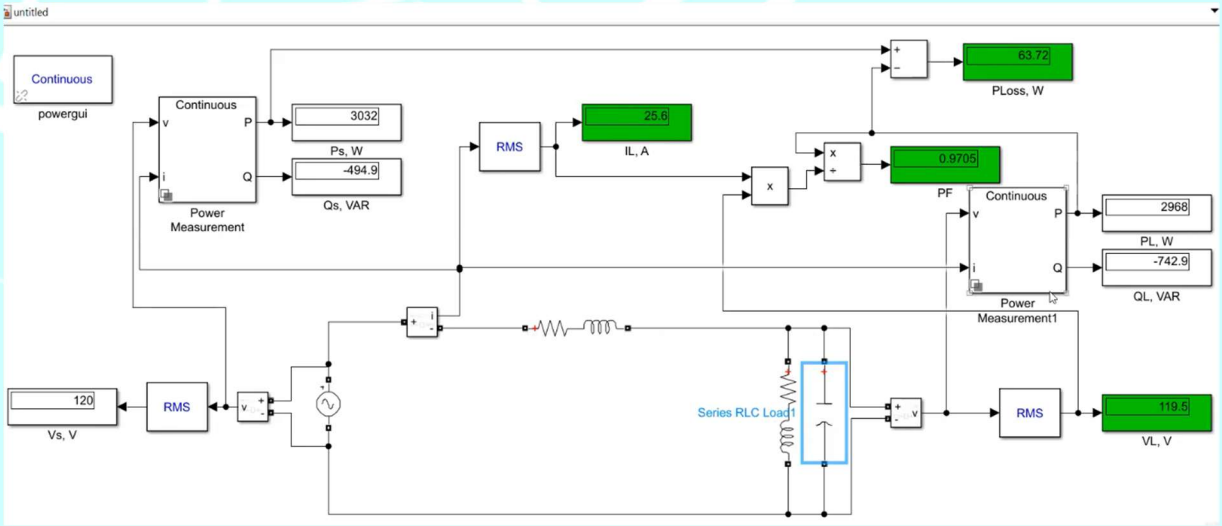
1-jadvalda elektr tarmoqlarida quvvat koeffitsienti cosφ ning o'zgarishi natijasida reaktiv quvvat, to'la quvvat, aktiv quvvat yo'qotishlari va iste'molchiga yetib keladigan foydali quvvat qanday o'zgarishini ko'rsatadi. Demak, yuqori quvvat koeffitsientini saqlash energiya samaradorligini oshirish va tarmoq yo'qotishlarini kamaytirish uchun muhimdir.

ISSN 3030-3907

1-jadval

cos φ	tgφ	Reaktiv quvvat Q =P·tgφ	To‘la quvvat S =P/cosφ	Aktiv yo‘qotishlar ΔP%=10%/cos²φ	Iste’molchidagi foydali quvvat P % dan (P–ΔP) gacha
1	0	0	100	10	90
0.9	0.484	48.4	111.1	12.3	87.7
0.8	0.75	75	125	15.6	84.4
0.7	1.02	102	142.8	20.4	79.6
0.5	1.732	173.2	200	40	60
0.316	3.016	301.6	316.5	100	0

Matematik hisob-kitoblar muhim bo‘lsa-da, ularni real sharoitda tekshirish va natijalarni vizual ko‘rinishda kuzatish uchun MATLAB/Simulink dasturi keng qo‘llaniladi. Simulink muhitida manba, yuklama va kompensatsiya elementlari blok ko‘rinishida tasvirlanib, tizim parametrlarining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi, quvvat oqimlari va quvvat koeffitsienti real vaqtga yaqin sharoitda kuzatiladi. Shu tariqa, nazariy modellashtirish bilan Simulink simulyatsiyasi birgalikda qo‘llanilganda, kerakli sig‘imli kondensator tanlanadi va uning kompensatsiya samarasi tajribada tasdiqlanadi.



2-rasm. Reaktiv quvvatni hisoblash va quvvat koeffitsientini baholash uchun MATLAB/Simulink modeli.

Ushbu 2-rasm MATLAB/Simulink muhitida qurilgan reaktiv quvvatni modellashtirish va kompensatsiya samaradorligini baholash modeli bo‘lib, tizimning yuklanishi va kuchlanish-tok rejimlari aniq ko‘rsatilgan. Mazkur model nazariy hisob-kitoblarni amaliy ko‘rinishda tekshirish imkonini beradi. Manba kuchlanishi 120 V etib olingan, yuk sifatida esa **Series RLC Load** qo‘llanilgan bo‘lib, uning induktiv va sig‘imli elementlari reaktiv quvvat oqimini hosil qiladi. Power Measurement bloklari yordamida manba va yuk tomonidagi aktiv va reaktiv

ISSN 3030-3907

quvvat qiymatlari aniqlangan: manbadan o‘tayotgan aktiv quvvat P_s=3032 W, reaktiv quvvat Q_s=−494.9 VAr, yuk tomonida esa P_L=2968 W va Q_L=−742.9 VAr qiymatlar qayd etilgan. RMS bloklari orqali tokning effektiv qiymati I=25.6 A, kuchlanish esa U_L=119.5 ga teng bo‘lib, yo‘qotishlar PLoss=63.72 W ni tashkil qilgan. Muhim tomoni shundaki, model quvvat koeffitsientini ham hisoblab beradi va natija PF=0.9705 chiqmoqda. Bu tizimda kompensatsiya hali to‘liq amalga oshirilmaganini bildiradi, chunki reaktiv quvvat sezilarli darajada manba va yuklama o‘rtasida almashinmoqda.

Mazkur matematik modellashtirishning amaliy ahamiyati shundaki, reaktiv quvvat asosida kondensator sig‘imi tanlanadi. Formulaga ko‘ra:

$$C = \frac{Q_C}{\omega U^2}$$

Bu yerda Q_c – kerakli kompensatsiya quvvati, ω=2πf– burchak chastota, U – kuchlanish. Tanlangan kondensator Simulink modeliga qo‘shilganda natijada quvvat koeffitsienti birlikka yaqinlashadi, reaktiv quvvat kamayadi, tok yuklanishi pasayadi va yo‘qotishlar qisqaradi. Shunday qilib, rasmda ko‘rsatilgan natijalar reaktiv quvvatni kompensatsiya qilishdan oldingi holatni ifodalaydi va matematik modellashtirishning Simulink muhiti bilan uzviy bog‘lanishi reaktiv quvvatni bartaraf etish jarayonini amalda ko‘rsatib beradi.

Modeldan foydalanib kondensatorni tanlash va natijani tekshirish tartibi quyidagicha bosqichma-bosqich bajariladi: avvalo, Simulink o‘lchovlari orqali aktiv quvvat P≈2968 W, kuchlanish U≈119.5V, tok I≈25.6A va to’la quvvat S≈UI≈3.06kVA qiymatlari olinadi. Shundan quvvat koeffitsienti aniqlanadi:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \approx 0.9705$$

Keyin reaktiv quvvat modulini hisoblash uchun:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \approx 743\text{VAr}$$

Rasmda Q_L=−742.9 VAr bo‘lib, manfiy ishora yukning sig‘imli xarakterini ko‘rsatadi, ya’ni ortiqcha sig‘imli kompensatsiya mavjud. Endi maqsadli quvvat koeffitsenti $\cos\varphi 2$=0.99 belgilansa, unda:

$$\tan\varphi 2 = \sqrt{\frac{1}{\cos\varphi\, 2^2} - 1} \approx 0.1425$$

va kerakli reaktiv komponent:

$$Q_2 = P\tan\varphi 2 \approx 2968 * 0.1425 \approx 423\text{VAr}$$

Shunday qilib, hozirgi holatdan maqsadga o‘tish uchun reaktiv komponentni $\Delta Q=Q-Q_2$ miqdorda tuzatish talab qilinadi. Bizning holatda Q<0 (sig‘imli yuk) bo‘lgani uchun sig‘imni kamaytirish yoki induktiv komponent qo‘shish lozim

ISSN 3030-3907

bo‘ladi. Agar kompensatsiya faqat kondensator yordamida amalga oshirilsa, zarur tuzatma sig‘imi quyidagi formula orqali topiladi:

$$\Delta C = \frac{\Delta Q}{\omega U^2}$$

Topilgan qiymat Simulinkdagi kondensator blokiga qo‘yilib, model qayta ishga tushirilgach, quvvat koeffitsenti $\cos\varphi \approx 0.99$ atrofida barqarorlashishi, Q modulining maqsadga yaqinlashishi, tok va I^2R yo‘qotishlarining (rasmda P_{Loss}≈63.7 W) kamayishi hamda yuk kuchlanishning barqarorlashishi kuzatiladi.

Demak, ushbu jarayon bosqichlari – (1) joriy $\cos\varphi$ va Q ni o‘lchash, (2) kerakli Q_2 ni hisoblash, (3) kondensatorni yangi qiymatga sozlash, (4) Simulink modeli natijalari orqali verifikatsiya qilish – barchasi bitta zanjirda uzluksiz bajarilib, reaktiv quvvatni boshqarishda matematik modellashtirish nazariy formulasini amaliy isbot bilan bog‘laydi.

O‘tkazilgan tadqiqot natijalari elektr energiya tizimlarida reaktiv quvvatni boshqarishning nazariy asoslari va amaliy modellashtirish imkoniyatlarini chuqur yoritib berdi. Reaktiv quvvatning ortiqcha miqdori tarmoqdagi toklar oqimini oshirishi, kuchlanishning pasayishi va issiqlik yo‘qotishlarining ko‘payishiga sabab bo‘lishi aniqlangan. Bu esa umumiy quvvat koeffitsientining pasayishiga va elektr uskunalarining samaradorligining kamayishiga olib keladi.

MATLAB/Simulink muhiti asosida ishlab chiqilgan matematik model yordamida manba va yuk parametrlari (aktiv quvvat, reaktiv quvvat, apparent quvvat, tok va kuchlanish qiymatlari) aniqlanib, ularning o‘zaro bog‘lanishlari matematik ifodalar orqali asoslab berildi. Modellash natijalari reaktiv quvvat kompensatsiyasi jarayonining bosqichma-bosqich amalga oshirilishini, quvvat koeffitsientining me’yoriy qiymatga yaqinlashishini, yo‘qotishlarning kamayishini va yuklama toki barqarorligini aniq ko‘rsatdi. Tadqiqotdan olingan natijalar reaktiv quvvatni boshqarishda matematik modellashtirishning amaliy ahamiyatini tasdiqlaydi hamda zamonaviy elektr energetika tizimlarida energiya samaradorligini oshirish, elektr ta’minoti sifatini yaxshilash va sanoat 4.0 konsepsiyasi talablari asosida raqamli boshqaruv texnologiyalarini keng joriy etish zarurligini ko‘rsatadi.

ADABIYOTLAR

1. Усманов, Э. Г. (2023). *Компенсация реактивной мощности*. Учебное пособие. Ташкент, 290 с.

2. Понятовский, В. В. (2009). *Коэффитсиент мошности и фактори, влияюшие на его значение в энергосистемах промишленных предприятий и портов*. Москва: Траслит, 54 с.

3. Кудрин, Б. И. (2001). *История компенсации реактивной мошности*. Электрика, (6), 26–29.

ISSN 3030-3907

4. Жежеленко, И. В., & Сайкено, Ю. Л. (2007). *Реактивная мошност в задачах электроэнергетики*. Москва: Электричества, 213 с.

ISSN 3030-3907