

UO'K: 621.3.072.9

0,4 kV TARMOQLARDA REAKTIV QUVVATNI KOMPENSATSIYALASHNING ELEKTR ENERGIYASI SIFAT KO'RSATKICHLARIGA TA'SIRI

Tolipov Jamshid Nurbekovich¹ – texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD),
ORCID: 0009-0009-2520-8995, E-mail: tolipovjamshidn@gmail.com

Murtazov Sherzod Isakbayevich¹ – mustaqil izlanuvchi,
ORCID: 0009-0002-5095-0234, E-mail: shermurtazov@gmail.com

Norboyev Anvar Eshmo'minovich² – texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD),
ORCID: 0009-0000-3474-3118, E-mail: a_norboyev@list.ru

¹O'zbekiston Fanlar akademiyasi Energetika muammolari instituti, Toshkent sh., O'zbekiston

²Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi sh., O'zbekiston

Annotatsiya. Mamlakatimizda elektr ta'minoti asosan havo uzatish liniyalari orqali amalga oshiriladi. Bunday tarmoqlar, o'z uzunligi sababli, kuchlanishning katta miqdordagi tushishiga olib keladi. Ayni vaqtda, aholi sektorida elektr energiyasi iste'moli tez sur'atlar bilan o'sib bormoqda. Bu esa o'z navbatida uzoq ekspluatatsiyaga ega elektr uzatish liniyalari (EUL) ning o'tkazuvchanlik salohiyatini oshirish maqsadida texnik chora-tadbirlarni doimiy ravishda amalga oshirishini talab etmoqda [1].

Amalda 0,4 kV tarmoqlarda qisqa fiderlar va nisbatan kichik ulanish quvvatlari mavjudligi sababli, reaktiv quvvatni kompensatsiyalash va yuqori tartibli garmonikalarni filtrlash iqtisodiy jihatdan samarasiz deb qaraladi. Biroq, boshqa mamlakatlar tajribasi shuni ko'rsatadiki, 0,4 kV li taqsimlovchi tarmoqlarda reaktiv quvvat kompensatsiyasi va garmonik filtratsiya qurilmalari keng qo'llanilmoqda hamda bu orqali elektr energiyasi sifati samarali tarzda yaxshilanmoqda. Mazkur maqolada 0,4 kVli taqsimlovchi elektr tarmoqlarida reaktiv quvvatni lokal kompensatsiyalash orqali elektr energiyasi sifatini yaxshilash imkoniyatlari tadqiq etilgan.

Ushbu maqolada reaktiv quvvatni kompensatsiyalash uchun lokal ko'ndalang kompensatsiya usuli qo'llanilgan. Kompensatsiyalovchi qurilmalar (Kondensator Batareyalari – KB) to'g'ridan-to'g'ri elektr uzatish liniyasiga ketma-ket tarzda, transformator podstantsiyasidan uzoqlashgan sari, kuchlanish og'ishining eng katta bo'lgan iste'molchi ulanish nuqtalariga o'rnatilgan. Ortiqcha kompensatsiyaning oldini olish maqsadida qurilmalarning quvvati mahalliy yuklamaga mos holda tanlangan.

Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki reaktiv quvvatni kompensatsiyalovchi qurilmalarni tarmoqqa taqsimlash orqali kuchlanish isroflarini nominal qiymatga nisbatan 3 % gacha kamaytirish imkoniyati hosil bo'ladi. Reaktiv quvvatni kompensatsiyalovchi qurilmalar o'rnatilgach, kuchlanishning nominaldan og'ishining o'rnatilgan qiymatlari ruxsat etilgan chegaralar doirasida bo'ladi.

Taklif etilgan metodika asosida tarmoqqa reaktiv quvvatni kompensatsiyalovchi qurilmalarni (RQK) taqsimlash orqali, barcha iste'molchilarda kuchlanish darajasi va kuchlanish nosimmetrikligi koeffitsientlari elektr energiyasi sifati bo'yicha amaldagi me'yorlarga muvofiqligi ta'minlanadi. Natijada, elektr tarmog'idagi aktiv quvvat isroflari RQK o'rnatilmagan holatga nisbatan 30 % gacha kamaytirilishi erishiladi.

Kalit so'zlar: reaktiv quvvatni kompensatsiyalash, quvvat koeffitsiyenti, elektr energiyasi sifati, kuchlanish isrofi, kuchlanish nosimmetrikligi koeffitsiyenti, 0,4 kV taqsimlovchi tarmoqlar, kondensator batareyalari, aktiv quvvat isroflari.

УДК: 621.3.072.9

ВЛИЯНИЕ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТЯХ 0,4 кВ

Толипов Жамшид Нурбекович¹ – доктор философии по техническим наукам (PhD)

Муртазов Шерзод Исакаевич¹ – самостоятельный соискатель

Норбоев Анвар Эшмуминович² – доктор философии по техническим наукам (PhD)

¹Институт энергетических проблем Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент

²Каршинский государственный технический университет, г.Карши, Узбекистан

Аннотация. В нашей стране электроснабжение осуществляется преимущественно по воздушным линиям электропередачи (ВЛ). В таких сетях, ввиду своей протяжённости, происходят значительные падения напряжения. При этом потребление электроэнергии в жилом секторе стремительно растёт. Это, в свою очередь, требует постоянного внедрения технических мероприятий по увеличению пропускной способности магистральных линий электропередачи (ЛЭП) [1].

На практике, ввиду наличия коротких фидеров и относительно небольших мощностей присоединений в сетях 0,4 кВ, компенсация реактивной мощности и фильтрация высших гармоник считаются экономически неэффективными. Однако опыт других стран показывает, что устройства компенсации реактивной мощности и фильтрации гармоник широко применяются в распределительных сетях 0,4 кВ, что позволяет эффективно повышать качество электроэнергии. В данной статье рассматриваются возможности повышения качества электроэнергии за счёт локальной компенсации реактивной мощности в распределительных сетях 0,4 кВ.

В данной статье для компенсации реактивной мощности применяется метод локальной поперечной компенсации. Компенсирующие устройства (батареи конденсаторов – КБ) устанавливаются непосредственно на линии электропередачи последовательно, по мере удаления от трансформаторной подстанции, в точках подключения потребителей с наибольшим отклонением напряжения. Для предотвращения перекомпенсации мощности устройств выбирается в соответствии с локальной нагрузкой.

Исследования показывают, что распределение устройств компенсации реактивной мощности в сети позволяет снизить потери напряжения до 3% от номинального. После установки устройств компенсации реактивной мощности заданные значения отклонения напряжения от номинала будут находиться в допустимых пределах.

На основании предложенной методики, распределение устройств компенсации реактивной мощности (КРМ) в сети обеспечивает соответствие уровня напряжения и коэффициентов несимметрии напряжения у всех потребителей действующим нормам качества электроэнергии. В результате потери активной мощности в сети снижаются до 30% по сравнению со случаем без установки КРМ.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, коэффициент мощности, качество электроэнергии, потери напряжения, коэффициент несимметрии напряжения, распределительные сети 0,4 кВ, конденсаторные батареи, потери активной мощности.

UDC: 621.3.072.9

INFLUENCE OF REACTIVE POWER COMPENSATION ON ELECTRIC POWER QUALITY INDICATORS IN 0.4 kV NETWORKS

Tolipov, Jamshid Nurbekovich¹ – Doctor of Philosophy in Technical Sciences (PhD),

Murtazov, Sherzod Isakbaevich¹ – independent researcher

Norboev, Anvar Eshmuminovich² – Doctor of Philosophy in Technical Sciences (PhD)

¹Institute of Energy Problems of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
Tashkent city, Uzbekistan

²Karshi State Technical University, Karshi city, Uzbekistan

Abstract. In our country, electricity is supplied primarily via overhead power lines (OPL). Due to their length, these networks experience significant voltage drops. Meanwhile, residential electricity consumption is rapidly increasing. This, in turn, requires the ongoing implementation of technical measures to increase the capacity of main power lines (TPL) [1].

In practice, due to the presence of short feeders and relatively low connection capacities in 0.4 kV networks, reactive power compensation and harmonic filtering are considered cost-ineffective. However, experience in other countries shows that reactive power compensation and harmonic filtering devices are widely used in 0.4 kV distribution networks, effectively improving power quality.

This article examines the potential for improving power quality through local reactive power compensation in 0.4 kV distribution networks.

This article uses a local shunt compensation method for reactive power compensation. Compensating devices (capacitor banks) are installed directly on the power line in series, increasing in distance from the transformer substation, at the connection points of consumers with the greatest voltage deviation. To prevent overcompensation, the device power is selected according to the local load.

Research shows that distributing reactive power compensation devices across the grid can reduce voltage losses to 3% of the nominal value. After installing reactive power compensation devices, the specified voltage deviations from the nominal value will be within acceptable limits.

Based on the proposed methodology, the distribution of reactive power compensation (RPC) devices in the network ensures that voltage levels and voltage unbalance factors for all consumers comply with current power quality standards. As a result, active power losses in the network are reduced by up to 30% compared to without RPC installation.

Keywords: reactive power compensation, power factor, power quality, voltage losses, voltage unbalance factor, 0.4 kV distribution networks, capacitor banks, active power losses.

Kirish

O'zbekiston respublikasida elektr ta'minoti asosan havo uzatish liniyalari orqali amalga oshiriladi. Bunday tarmoqlar, o'z uzunligi sababli, kuchlanishning katta miqdordagi tushishiga olib keladi. Ayni vaqtda, aholi sektorida elektr energiyasi iste'moli tez sur'atlar bilan o'sib bormoqda. Bu esa o'z navbatida shuni ko'rsatmoqdaki, o'tgan asrning ikkinchi yarmida elektr yuklamalari normalari asosida loyihalashtirilgan elektr uzatish liniyalari (EUL) hozirgi kunda zarur o'tkazuvchanlik salohiyatiga ega emas, natijada elektr energiyasi sifati (EES) iste'molchilarda ko'p hollarda amaldagi me'yorlarga javob bermayapti [1].

Agar elektr energiyasi sifat talablariga javob bermaydigan tarzda tarmoq orqali uzatilsa, bu holat energiya yo'qotishlarining ortishiga olib keladi. Shu bois 0,4 kV li qishloq taqsimlovchi tarmoqlarda EES ni oshirishga qaratilgan samarali chora-tadbirlarni ko'rish masalasi kun tartibiga chiqmoqda.

Amalda 0,4 kV tarmoqlarda qisqa fiderlar va nisbatan kichik ulanish quvvatlari mavjudligi sababli, reaktiv quvvatni kompensatsiyalash va yuqori tartibli garmonikalarni filtrlash iqtisodiy jihatdan samarasiz deb qaraladi. Biroq, boshqa mamlakatlar tajribasi shuni ko'rsatadiki, 0,4 kV li taqsimlovchi tarmoqlarda reaktiv quvvat kompensatsiyasi va garmonik filtratsiya qurilmalari keng qo'llanilmoqda hamda bu orqali elektr energiyasi sifati samarali tarzda yaxshilanmoqda [2].

Usul va materiallar

Tadqiqotda qabul qilingan metodika bo'yicha reaktiv quvvatni kompensatsiyalash uchun lokal ko'ndalang kompensatsiya usuli tanlandi. Ushbu usulda kompensatsiyalovchi qurilmalar (Kondensator Batareyalari – KB) to'g'ridan-to'g'ri elektr uzatish liniyasiga ketma-ket tarzda, transformator podstantsiyasidan uzoqlashgan sari, kuchlanish og'ishining eng katta bo'lgan iste'molchi ulanish nuqtalariga o'rnatildi. Qurilmalarning quvvati mahalliy yuklamaga mos holda tanlanib, ortiqcha kompensatsiyaga yo'l qo'ymaslik prinsipiga asoslanildi.

0,4 kVli tarmoqlar uchun elektr energiyasi sifati (EES)ning asosiy ko'rsatkichlaridan biri - bu kuchlanishning og'ishi (δU_y), shuningdek, teskari ketma-ketlik bo'yicha kuchlanish nosimmetrikligi koeffitsienti (K_{2U}) va nol ketma-ketlik bo'yicha kuchlanish nosimmetrikligi koeffitsienti (K_{0U}) hisoblanadi.

Ijobiy va salbiy kuchlanish og'ishlari elektr energiyasini uzatish nuqtasida, bir haftalik davr mobaynida vaqtning 100 foizi davomida, nominal yoki kelishilgan kuchlanish qiymatining 10 foizidan oshmasligi lozim. 110 kV dan past bo'lgan havo elektr uzatish liniyalari orqali elektr energiyasi uzatilganda, kuchlanishning muqarrar kamayishi kuzatiladi, bu quyidagi (1) ifoda bilan belgilanadi:

$$\delta U = U_1 - U_2, \quad (1)$$

bu yerda $\underline{U}_1$ - liniya boshidagi kuchlanish; $\underline{U}_2$ - liniya oxiridagi kuchlanish.

$\Delta U = U_1 - U_2$ ifodasi kuchlanish isrofi (yoki kuchlanishning pasayishi) deb ataladi. Nominal kuchlanishi 110 kV va undan past bo'lgan havo liniyalari uchun, odatda, liniyaning aktiv qarshiligi R va induktiv qarshiligi X o'zaro taxminan teng bo'ladi yoki R qiymati X dan yuqori bo'ladi.

Shu sababli, bunday tarmoqlarni hisoblashda kuchlanish pasayishining ko'ndalang tashkil etuvchi qismini (ya'ni, mavhum qismini) hisobga olmaslik mumkin bo'ladi, bunda [3]

$$\Delta U = \frac{PR - QX}{U_1}. \quad (2)$$

(2)-ifodadan ko'rinadiki, kuchlanish isrofini kamaytirish uchun liniya qarshiligini yoki reaktiv quvvat Q ni kamaytirish zarur. Havo elektr uzatish liniyalarining qarshiligini kamaytirish juda katta xarajatlarni talab qilgani sababli, alternativ chora sifatida reaktiv quvvatni kamaytirish mumkin. Past kuchlanishli tarmoqlarda reaktiv quvvat, odatda, iste'mol qilinmaydi va faqat kuchlanish isrofiga, natijada esa aktiv quvvat yo'qotilishiga olib keladi.

Tarmoqqa parallel ulangan kondensatorlar orqali amalga oshiriladigan kompensatsiya usuli ko'ndalang kompensatsiya deb ataladi. Ushbu kompensatsiya jarayonida kondensatorlar reaktiv quvvatni generatsiya qilish orqali quvvat koeffitsientini oshiradi va shu bilan birga tarmoqdagi kuchlanishni boshqaradi, chunki ular tarmoqdagi kuchlanish isrofini kamaytiradi [4].

Kondensator batareyasi (KB) tomonidan generatsiya qilinadigan reaktiv quvvat (kVAr) quyidagicha (3) ifodalanadi [4],

$$Q_C = U^2 2\pi f C. \quad (3)$$

Kondensatorlarni tanlashda asosiy mezon — bu aktiv yuklama miqdori o'zgarmagan holda tarmoqdagi kuchlanishni oshirish zaruratidir. Bu holat kondensatorlar ulanmasidan oldingi va ulardan keyingi kuchlanish isrofi o'rtasidagi farq (4) orqali aniqlanadi:

$$\Delta U = \Delta U_1 - \Delta U_2 = \frac{P_1 r_{\text{Л}} + Q_1 x_L - (P_2 r_{\text{Л}} + Q_2 x_L)}{U_{\text{НОМ}}^2}, \quad (4)$$

bu yerda P_1 , P_2 va Q_1 , Q_2 — aktiv va reaktiv quvvat; $r_{\text{Л}}$ va x_L - tarmoq qarshiligi. Qo'shimcha reaktiv quvvat Q_C ni kiritish orqali tarmoqning reaktiv yuklamasi kamayadi ($Q_2 = Q_1 - Q_C$). Chunki $P_1 = P_2$, ya'ni aktiv quvvat o'zgarmaydi, buning natijasida rostdash kuchlanishning nisbiy o'zgarishi quyidagicha (5) ifodalanadi:

$$U_{\text{rost}} = \frac{Q_C x_L}{U_{\text{ном}}^2}. \quad (5)$$

[5] da qishloq joylardagi 0,4 kV li taqsimlovchi tarmoqlarda reaktiv quvvatni lokal ko'ndalang kompensatsiyalash usuli taklif etilgan. Ushbu ish mualliflari tomonidan 0,4 kVli elektr tarmoqlarida o'rtacha quvvat koeffitsiyenti $\cos\varphi = 0,8$ va undan past bo'lgan barcha iste'molchilarda o'rnatilgan kuchlanishning og'ishi ruxsat etilgan chegaralarda bo'lishini ta'minlash maqsadida reaktiv quvvatni kompensatsiyalash qurilmalarini joylashtirish metodikasi ishlab chiqilgan.

Mazkur metodikaga ko'ra, reaktiv quvvatni kompensatsiyalash qurilmalari bevosita elektr uzatish liniyasiga joylashtiriladi va ularning quvvati 50 kVAr dan oshmasligi lozim. Reaktiv quvvatni kompensatsiyalash qurilmalarini o'rnatish transformator podstantsiyasidan (TP) eng yaqin joylashgan va kuchlanish og'ishi ruxsat etilgan chegaralarga javob bermaydigan birinchi iste'molchi ulanish nuqtasidan boshlanishi kerak. (1) ifodaga muvofiq (yoki bevosita o'lchash orqali) barcha iste'molchi ulanish nuqtalaridagi kuchlanish og'ishining yangilangan qiymatlari hisoblangach, navbatdagi reaktiv quvvatni kompensatsiyalash qurilmasi yana TP ga eng yaqin joylashgan va kuchlanish og'ishi me'yordan chetga chiqqan nuqtaga o'rnatiladi.

Bu jarayon barcha iste'molchi ulanish nuqtalaridagi kuchlanish og'ishi ruxsat etilgan chegaralarga mos kelmaguncha davom ettiriladi.

Bundan tashqari, reaktiv quvvatni kompensatsiyalash qurilmalarini o'rnatish joylari aniqlanayotganda, ularning reaktiv quvvati ham hisobga olinadi, shunda ular liniyada ortiqcha kompensatsiya (ya'ni, ortiqcha reaktiv quvvat hosil bo'lishi)ga olib kelmasligi kerak.

Teskari va nol ketma-ketlik bo'yicha kuchlanish nosimmetrikligi ko'effitsientlari uchun elektr energiyasi sifati bo'yicha (GOST R 54149–2010 (standartga muvofiq quyidagi me'yorlar belgilangan:

- elektr energiyasini uzatish nuqtasida, 10 daqiqalik vaqt oralig'ida o'rtacha hisoblangan teskari ketma-ketlik bo'yicha kuchlanish nosimmetrikligi ko'effitsienti (K_{2U}) va nol ketma-ketlik bo'yicha kuchlanish nosimmetrikligi ko'effitsienti (K_{0U}) bir haftalik davrning 95 % davomida 2% dan oshmasligi lozim;

- Shu bilan birga, ushbu ko'effitsientlarning 10 daqiqa oralig'ida o'rtacha qiymatlari haftalik davrning 100% vaqtida 4 % dan oshmasligi kerak.

Liniya fazalarining yuklanishi notekis bo'lgan hollarda, quvvat isroflari nafaqat faza o'tkazgichlarida, balki nol sim orqali oqayotgan tok hisobiga ham ortadi [6]:

$$I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 \geq 3I_{cp}^2,$$

bu yerda I_{cp}^2 - uch fazaning har birida bir xilda taqsimlangan yuklama sharoitida oqadigan o'rtacha faza toki.

Uch simli liniyada faza yuklamasining notekisligi natijasida quvvat isroflari N^2 marta ortadi, to'rt simli liniyada esa bu holat quyidagi ifoda orqali hisobga olinishi mumkin [7]

$$N^2 \left(1 + 1,5 \frac{R_H}{R_\phi} \right) - 1,5 \frac{R_H}{R_\phi}, \quad (6)$$

bu yerda R_H va R_ϕ - mos ravishda nol sim va faza simining qarshiligi;

N^2 - liniya fazalarining yuklama notekisligi ko'effitsientining kvadrati bo'lib, u quyidagi ifoda orqali aniqlanadi

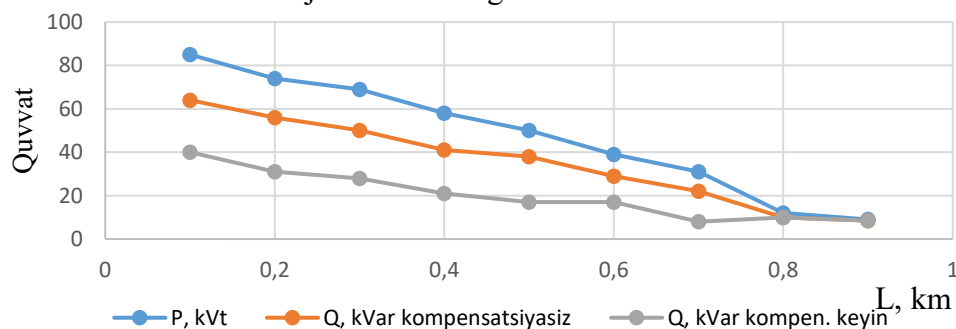
$$N^2 = \frac{1}{3} \left[\left(\frac{I_A}{I_{cp}} \right)^2 + \left(\frac{I_B}{I_{cp}} \right)^2 + \left(\frac{I_C}{I_{cp}} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

Elektr tarmog'ini ekspluatatsiya qilish bosqichida faza yuklamalarining notekisligini kamaytirish zarur. Bunda ikki xil nosimmetriya turi ajratib ko'rsatiladi:

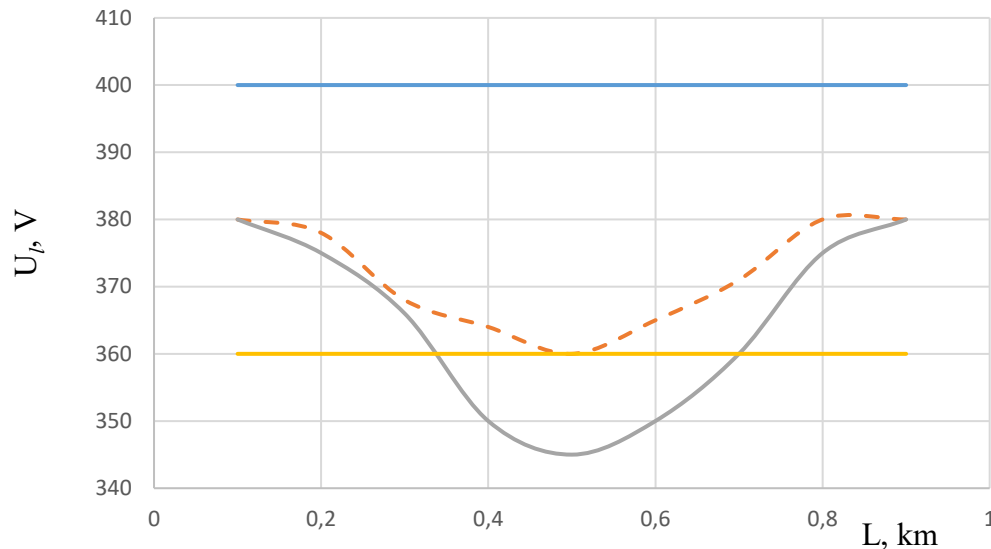
- Ehtimoliy nosimmetriya - bunda turli vaqtlarda bir faza, so'ngra boshqa faza ko'proq yuklama oladi;
- Tizimli (sistematik) assimetriya - bu holatda uzoq muddat davomida faza toklarining o'rtacha qiymatlari bir-biridan farq qiladi [6].

Natijalar

1-rasmda [5] manbada tavsiya etilgan reaktiv quvvatni kompensatsiyalash qurilmalarini taqsimlash metodikasidan foydalangan holda, kompensatsiyagacha bo'lgan aktiv va reaktiv quvvat hamda kompensatsiyadan keyingi reaktiv quvvat hisoblash natijalari keltirilgan. Hisob-kitoblar transformator podstantsiyasining hisobiy yuklamalarini yig'ish metodikasi asosida amalga oshirilgan [8]. 2-rasmda kompensatsiyadan oldin va kompensatsiyadan keyin elektr uzatish liniyasidagi kuchlanish isroflarini hisoblash natijalari ko'rsatilgan.



1-rasm. Liniya uzunligiga bog'liq ravishda aktiv va reaktiv quvvatlarning o'zgarishi. RQK qurilmalari mos ravishda $L=0,5$ km, $Q_C=20,9$ kVar va $L=0,7$ km, $Q_C=17$ kVar.



2-rasm. Liniya bo'ylab har 0,1 km oraliqda joylashgan tugunlardagi hisoblangan kuchlanish qiymatlari: 400 V - transformator podstantsiyasi (TP) chiqishidagi kuchlanish; 360 V - ruxsat etilgan minimal kuchlanish qiymati (400 V dan 10 % kamayish). To'liq chiziq - kompensatsiyasiz holatdagi kuchlanish isroflari; Punktir chiziq - kompensatsiyadan keyingi kuchlanish isroflari.

Keltirilgan grafiklardan ko'rinadiki, taklif etilgan metodika asosida reaktiv quvvatni kompensatsiyalovchi qurilmalarni tarmoqqa taqsimlash orqali kuchlanish isroflarini nominal qiymatga nisbatan 3 % gacha kamaytirish mumkin. Reaktiv quvvatni kompensatsiyalovchi qurilmalari o'rnatilgach, kuchlanishning nominaldan og'ishining o'rnatilgan qiymatlari ruxsat etilgan chegaralar doirasida bo'ladi.

Kuchlanish nosimmetrikligi elektr ta'minoti tizimida teskari ($\underline{I}_2$) va nol ($\underline{I}_0$) ketma-ketlikdagi toklarning mavjudligi bilan bog'liq bo'lib, bular nosimmetrik (notekis) yuklamalar natijasida yuzaga keladi. Bu holatda faza toklarining vektorlari va ular orasidagi burchaklar o'zaro farqlanadi. Ma'lumki, bunday toklarni uchta simmetrik tarkibiy qism - to'g'ri ketma-ketlik ($\underline{I}_1$), teskari ketma-ketlik ($\underline{I}_2$) va nol ketma-ketlik ($\underline{I}_0$) komponentlari orqali ifodalash mumkin. Simmetrallashtirishning vazifasi - yuklamaga parallel ravishda (ya'ni, o'sha shinalarga) shunday qurilmani ulashdan iboratki, u yuklama tomonidan hosil qilingan teskari va (yoki) nol ketma-ketlikdagi toklarni kompensatsiyalasinsin. Bunday holda, kompensatsiyalovchi qurilmaning toki o'z qiymati bo'yicha yuklama tomonidan yaratilgan tegishli tokka teng, lekin faza bo'yicha unga qarama-qarshi bo'lishi lozim.

Fazalararo kompensatsiya va simmetriyalashtirish holatida simmetriyalashtiruvchi qurilmaning liniyaviy o'tkazgichlarida nol ketma-ketlikdagi tok mavjud bo'lmaydi. Shu sababli, kondensator batareyalarini (KB) bunday ulash sxemasida nol ketma-ketlik bo'yicha simmetriyalashtiruvchi effektga erishish mumkin emas [3]. Endi esa reaktiv quvvatning fazaviy kompensatsiyasi sharoitida simmetriyalashtiruvchi effekti ko'rib chiqiladi. Bu holatda kompensatsiyalovchi qurilmaning assimetrik toklar tizimi - ya'ni $\underline{I}_{ak}$, $\underline{I}_{bk}$, $\underline{I}_{ck}$, simmetrik tarkibiy qismlar shaklida quyidagicha ifodalanadi.

$$\begin{aligned}\underline{I}_{1k} &= \frac{1}{3}(\underline{I}_{ak} + a\underline{I}_{bk} + a^2\underline{I}_{ck}); \\ \underline{I}_{2k} &= \frac{1}{3}(\underline{I}_{ak} + a^2\underline{I}_{bk} + a\underline{I}_{ck}); \\ \underline{I}_{0k} &= \frac{1}{3}(\underline{I}_{ak} + \underline{I}_{bk} + \underline{I}_{ck});\end{aligned}\tag{8}$$

bu yerda

$$\begin{aligned}\underline{I}'_A &= \underline{I}_a + \underline{I}_{ak}; \\ \underline{I}'_B &= \underline{I}_b + \underline{I}_{bk}; \\ \underline{I}'_C &= \underline{I}_c + \underline{I}_{ck};\end{aligned}\quad (9)$$

bu yerda $\underline{I}'_A$, $\underline{I}'_B$, $\underline{I}'_C$ - kompensatsiyadan keyingi liniya toklari, $\underline{I}_a$, $\underline{I}_b$, $\underline{I}_c$ - kompensatsiyagacha bo'lgan liniya toklari. Shuni inobatga olamizki, kompensatsiyadan keyingi liniyaviy toklar simmetrik bo'lishi kerak, ya'ni: $\underline{I}'_A = I'_A$, $\underline{I}'_B = a^2 \cdot I'_B$, $\underline{I}'_C = a \cdot I'_C$, va $I'_A = R_e(\underline{I}_a)$, $I'_B = R_e(\underline{I}_b)$, $I'_C = R_e(\underline{I}_c)$.

(5) ifodani (4) ga qo'yadigan bo'lsak, quyidagiga ega bo'lamiz:

$$\begin{aligned}\underline{I}_{1k} &= \frac{1}{3} j(I_a \sin \varphi_{iA} + I_b \sin \varphi_{iB} + I_c \sin \varphi_{iC}); \\ \underline{I}_{2k} &= \frac{1}{3} j(I_a \sin \varphi_{iA} + a I_b \sin \varphi_{iB} + a^2 I_c \sin \varphi_{iC}); \\ \underline{I}_{0k} &= \frac{1}{3} j(I_a \sin \varphi_{iA} + a^2 I_b \sin \varphi_{iB} + a I_c \sin \varphi_{iC});\end{aligned}\quad (10)$$

bu yerda $\varphi_{iA} = \varphi_{uA} - \varphi_A$, φ_A - mos keluvchi faza kuchlanishi va tok o'rtasidagi fazalar farqi. (10) tenglamalar tizimi kondensator batareyasining simmetriyalashtiruvchi effektini tavsiflaydi. Ushbu tenglamalar tizimini yechish shuni ko'rsatadiki, kondensator batareyalarini bunday ulash sxemasi orqali nol ketma-ketlik bo'yicha simmetriyalashtiruvchi effektga erishish mumkin. Qishloq hududlaridagi 0,4 kVli tarmoqlar uchun asosiy muammo - bu nol ketma-ketlik bo'yicha kuchlanish nosimmetrikligi koeffitsienti ruxsat etilgan qiymatidan 2-2,5 baravar yuqori bo'lishidir. Reaktiv quvvatni kompensatsiyalash qurilmalari (RQK) yordamida ushbu koeffitsientni sezilarli darajada yaxshilash mumkin.

Keltirilgan metodika va simmetriyalashtiruvchi effektini hisobga olgan holda lokal RQK tizimlarining iqtisodiy samaradorligini aniqlaymiz.

Tarmoqlardagi kuchlanishning pasayishi - elektr uzatish liniyalari hamda pasaytiruvchi transformatorlarda aktiv quvvat isroflarining ortishiga olib keladi.

Elektr tarmog'idagi aktiv quvvat isroflarini quyidagi ifoda orqali aniqlash mumkin [8]:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = \frac{P^2(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)}{U^2} R = \frac{P^2 R}{U^2} \cdot \frac{1}{\cos^2 \varphi} \quad (11)$$

bu yerda P, Q, U - liniya orqali uzatilayotgan aktiv va reaktiv quvvatlar, liniya kuchlanishi, R - liniyaning ekvivalent aktiv qarshiligi ($R=rL$, bu yerda r - liniyaning birlik uzunligiga to'g'ri keluvchi aktiv qarshiligi, L - liniya uzunligi); $\cos \varphi$ - quvvat koeffitsienti (faza burchagi kosinusi); $\operatorname{tg} \varphi$ - tarmoqdagi reaktiv quvvat koeffitsienti (faza burchagi tangensi). (7) ifodadan ko'rinadiki, uzatilayotgan quvvat P va liniyadagi kuchlanish U o'zgarmas holatda bo'lsa, quvvat isroflari quvvat koeffitsienti ($\cos \varphi$) hamda liniya uzunligi (L) ga bog'liq bo'ladi. Aktiv quvvat isroflari hisobi 10(6)–0,4 kVli hududiy taqsimlovchi elektr tarmoqlari uchun eng xarakterli, o'rtacha $\cos \varphi = 0,85$ qiymati asosida va kompensatsiyadan keyingi holatda $\cos \varphi = 1$ deb qabul qilingan. Shunda, (7) ifodaga muvofiq, kompensatsiyadan keyin aktiv quvvat isroflari quyidagi miqdorga kamayadi:

$$\Delta P - \Delta P_k = \frac{P^2 R}{U^2} \cdot \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi} - \frac{1}{\cos^2 \varphi'} \right) = \frac{P^2 R}{U^2} \cdot 0,38 \quad (12)$$

Bunday holatda, liniyadagi quvvat isroflari $\frac{\Delta P - \Delta P_k}{\Delta P} \cdot 100\% = 27,5\%$ ga kamayadi.

Transformatorlardagi aktiv quvvat isroflari ikki tarkibiy qismdan iborat: yuklama tokiga bog'liq bo'lgan transformator o'ramlarini qizitishga sarflanadigan isroflar (ΔP) va yuklama tokiga bog'liq bo'lmagan transformatoridagi po'lat o'zakni qizitishga sarflanadigan isroflar (ΔP_{CT}) [8]. Transformator o'ramlarini qizitishga ketadigan quvvat isroflari quyidagiga teng bo'ladi:

$$\Delta P = 3I^2 R_T = \frac{S^2}{U^2} R_T = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R_T \quad (13)$$

Shunda umumiy aktiv quvvat isroflari

$$\Delta P_T = \Delta P + \Delta P_{CT} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R_T + \Delta P_{CT} \quad (14)$$

bu yerda R_T - transformator o'ramlarining aktiv qarshiligi, Om.

Agar qisqa tutashuvdagi isroflar $\Delta P_{M.HOM}$ (ya'ni transformator nominal yuklamasi S_{HOM} sharoitida misda yuzaga keladigan isroflar) ma'lum bo'lsa va transformatorning amaldagi yuklamasi S ma'lum bo'lsa, u holda aktiv quvvat isroflari quyidagicha aniqlanadi

$$\Delta P_T = \Delta P + \Delta P_{CT} = \Delta P_{M.HOM} \left(\frac{S}{S_{HOM}} \right)^2 + \Delta P_{CT} \quad (15)$$

0,4 kV tomonida reaktiv quvvat kompensatsiyasi amalga oshirilganda, aktiv quvvat isrofi kamayadi va quyidagi qiymatga teng bo'ladi

$$\Delta P'_T = \Delta P_{M.HOM} \left(\frac{S'}{S_{HOM}} \right)^2 + \Delta P_{CT}, \quad (16)$$

bu yerda $S' = \sqrt{P^2 + Q^2} = \frac{P}{\cos \varphi'}$, $\cos \varphi'$ - kompensatsiyadan keying quvvat koeffitsiyenti.

Kompensatsiyadan keyin transformatoridagi quvvat isroflari qanchalik o'zgarishini aniqlaymiz:

$$\Delta P_T - \Delta P'_T = \frac{\Delta P_{M.HOM} P^2}{S_{HOM}^2} \cdot \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi} - \frac{1}{\cos^2 \varphi'} \right) \quad (17)$$

Quvvat koeffitsiyenti $\cos \varphi$ ning qiymati 0,85 dan 0,95 gacha oshirilganda

$$\frac{\Delta P_T - \Delta P'_T}{\Delta P_T} \cdot 100\% = 20\%.$$

Shunday qilib, transformator to'liq yuklama ostida ishlaganda, kompensatsiyadan keyingi quvvat isrofi kompensatsiyagacha bo'lgan misdagi isroflardan 20 % ga kam bo'ladi. Agar misdagi quvvat isrofining o'rtacha qiymatini 1,5% deb qabul qilsak [8], unda RQK (reaktiv quvvat kompensatsiyasi) hisobiga transformatorning umumiy isrofi 0,3 % ga kamaytirilishi mumkin.

RQK (reaktiv quvvat kompensatsiyasi) sharoitida simmetralashtiruvchi effektni hisobga olgan holda aktiv quvvat isrofini kamayishini aniqlaymiz. Nol simdagi tok nol ketma-ketlikdagi tokning uch barobariga teng bo'lganligi sababli, (6) ifodaga ko'ra, RQKdan so'ng uning qanchalik kamayishini aniqlaymiz. Hatto liniyaning faqat bitta fazasida RQK amalga oshirilganda ham, $\cos \varphi$ qiymatining 0,85 dan 1 gacha oshishi nol simdagi tokning 1 % ga kamayishiga, bu esa RQKsiz holatga nisbatan aktiv quvvat isrofining 2 % ga qisqarishiga olib keladi.

Shunday qilib, ko'rib chiqilayotgan liniya uchun umumiy isroflar (liniyadagi isroflar, transformatorlardagi isroflar va kuchlanish nosimmetrikligidan kelib chiqadigan isroflar) RQK (reaktiv quvvat kompensatsiyasi) o'rnatilmagan rejimga nisbatan $27,5\% + 0,3\% + 2\% = 29,8\%$ ga kamayadi.

Xulosa

Ushbu ishda ko'rsatilganidek, quvvat koeffitsienti past bo'lgan 0,4 kVli elektr tarmoqlarda lokal ko'ndalang kompensatsiya orqali quyidagi asosiy elektr energiyasi sifati (EES) ko'rsatkichlarini sezilarli darajada yaxshilash mumkin: o'rnatilgan kuchlanishning og'ishi va kuchlanish nosimmetrikligi koeffitsientlari. Taklif etilgan metodika asosida tarmoqqa reaktiv quvvatni kompensatsiyalovchi qurilmalarni (RQK) taqsimlash orqali, barcha iste'molchilarda kuchlanish darajasi va kuchlanish nosimmetrikligi koeffitsientlari elektr energiyasi sifati bo'yicha amaldagi me'yorlarga muvofiqligi ta'minlanadi. Natijada, elektr tarmog'idagi aktiv quvvat isroflari RQK o'rnatilmagan holatga nisbatan 30% gacha kamaytirilishi mumkin.

Taklif etilgan yechimlar, umuman olganda, elektr tarmoqlarida elektr energiyasini uzatish va iste'mol qilish samaradorligini oshirish, elektr uzatishning foydali ish koeffitsientini (FIK) oshirish hamda elektr tarmoqlari korxonalarining ish faoliyatini iqtisodiy jihatdan samaraliroq qilish imkonini beradi.

Adabiyotlar

- [1] Волков Н.Г. Качество электроэнергии в системах электроснабжения: учебное пособие. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. -152 с.
- [2] Baek J., Park M.H., Kim T., Youn H.S. Modified Power Factor Correction (PFC) Control and Printed Circuit Board (PCB) Design for High-Efficiency and High-Power Density On-Board Charger. *Energies* 2021, 14, 605. <https://doi.org/10.3390/en14030605>
- [3] Карташев И.И., Тульский В.Н. и др. Управление качеством электроэнергии: под ред. Шарова Ю.В.М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 354 с.
- [4] Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. М.: Высшая школа, 1990. 363 с.
- [5] Карчин В.В., Сидорова В.Т. Локальная компенсация реактивной мощности в сельских распределительных сетях 0,4 кВ // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*. 2014. №11. С. 21-24.
- [6] Пospelов Г.Е., Сыч Н.Д. Потери мощности и энергии в электрических сетях / под ред. Г.Е. Пospelова. М.: Энергоатомиздат, 1981. 216 с.
- [7] Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / В.Э. Воротницкий, Ю.С. Железко, В.Н. Казанцев и др./под ред. В.Н. Казанцева. М.: Энергоатомиздат, 1983. 368 с.
- [8] Каганов И.Л. Курсовое и дипломное проектирование. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1990. 351 с.