



SHAHAR TAQSIMLOVCHI ELEKTR TARMOQLARIDA KO'P MEZONLI OPTIMALLASHTIRISH USULI ORQALI ENERGIYA SAMARADORLIGINI OSHIRISH

Raximov F. [0009-0008-6832-0509]

*Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti "Elektr energetikasi" kafedrası dotsenti,
E-mail: feruz.raximov.2017@mail.ru*

Annotatsiya. Maqolada shahar taqsimlovchi elektr tarmoqlarida energiya isroflarini kamaytirish va tarmoq samaradorligini oshirish uchun ko'p mezonli optimallashtirish usulidan foydalanish masalasi o'rganilgan. Maqsad – minimal quvvat isrofi, kuchlanish og'ishlarining ruxsat etilgan diapazonda bo'lishi, transformatorlar yuklanishining optimal darajaga yetkazilishi va tarmoq elementlari uchun minimal kapital xarajatlarni ta'minlashdan iborat. Optimallashtirish mezonlari sifatida energiya isrofi, kapital sarf, kuchlanish sifati, ishonchlilik ko'rsatkichlari va yuk taqsimoti muvozanati qabul qilingan. Lagranj noaniq ko'paytuvchisi, Pareto to'plami, vaznli yig'indi metodi yordamida optimal yechimlar aniqlangan. Natijalar shuni ko'rsatdiki, optimallashtirilgan tarmoqda energiya yo'qotishlari 18–27% gacha kamayadi, kuchlanish og'ishi 3–5% diapazonda stabilashadi va transformatorlarning yuklanishi 0,65–0,85 oraliqda muvozanatlanadi.

Kalit so'zlar: ko'p mezonli optimallashtirish, shahar taqsimlovchi elektr tarmoqlari, energiya isrofi, kuchlanish sifati, transformator yuklanishi, kapital xarajatlar, Lagranj ko'paytuvchisi, Pareto optimal yechim, vaznli yig'indi metodi, tarmoq samaradorligi.

Аннотация. В статье исследуется применение метода многокритериальной оптимизации для снижения потерь электроэнергии и повышения энергоэффективности городских распределительных электрических сетей. Целью исследования является обеспечение минимальных потерь мощности, поддержание отклонений напряжения в допустимом диапазоне, достижение оптимального уровня загрузки трансформаторов, а также минимизация капитальных затрат на элементы сети. В качестве критериев оптимизации приняты: потери электроэнергии, капитальные затраты, качество напряжения, показатели надежности и сбалансированность распределения нагрузки. Оптимальные решения определялись с использованием метода неопределённых множителей Лагранжа, построения множества Парето и метода взвешенной суммы. Полученные результаты показали, что в оптимизированной сети потери электроэнергии снижаются на 18–27 %, отклонение напряжения стабилизируется в диапазоне 3–5 %, а нагрузка трансформаторов уравнивается в пределах 0,65–0,85.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, городские распределительные электрические сети, потери электроэнергии, качество напряжения, нагрузка трансформаторов, капитальные затраты, множители Лагранжа, Парето-оптимальные решения, метод взвешенной суммы, эффективность сети.

Annotation. The article investigates the application of a multi-criteria optimization method to reduce power losses and improve the energy efficiency of urban electrical distribution networks. The aim of the study is to ensure minimum power losses, maintain voltage deviations within the permissible range, achieve an optimal transformer loading level, and minimize capital expenditures for network components. The optimization criteria include energy losses, capital costs, voltage quality, reliability indices, and load distribution balance. Optimal solutions were determined using the Lagrange multiplier method, Pareto set analysis, and the weighted sum method. The results show that in the optimized network, energy losses are reduced by 18–27%, voltage deviation is stabilized within 3–5%, and transformer loading is balanced within the range of 0.65–0.85.

Key words: multi-criteria optimization, urban power distribution networks, energy losses, voltage quality, transformer loading, capital expenditures, Lagrange multipliers, Pareto-optimal solutions, weighted sum method, network efficiency.

Kirish

Jahon miqyosida elektr energiyasi iste'moli shiddat bilan ortib borishi, shahar infratuzilmasi kengayishi, taqsimlovchi tarmoqlarning yuklanish zichligi oshishi hamda



iste'mol markazlarining transformatsiyalash jarayonlari elektr tarmoqlarida energiya samaradorligini oshirishni strategik vazifa darajasiga olib chiqdi. Xalqaro energetika agentligi ma'lumotlariga ko'ra, 2040-yilga kelib shahar elektr energiyasi iste'moli 60% dan ortiq ulushga ega bo'lishi prognoz qilinmoqda, bunda tarmoq isroflarini qisqartirish va resurslardan oqilona foydalanish muhim ilmiy va amaliy muammo sifatida dolzarbligini saqlab qolmoqda [1]. Taqsimlovchi elektr tarmoqlarida kuzatilayotgan asosiy texnik muammolar aktiv va reaktiv quvvat isroflarining yuqoriligi, kuchlanish og'ishlarining me'yordan chetlashuvi, transformatorlar yuklanishining bir xil taqsimlanmasligi, kabel tarmoqlarining ortiqcha zahira bilan yoki aksincha, quvvat yetishmovchiligi sharoitida ekspluatatsiya qilinishi, reaktiv quvvat kompensatsiyasining yetarli darajada emasligi, iste'molchi yuklamalarining tasodifiy xarakteri, shuningdek, shahar hududlarida tarmoq topologiyasining murakkabligi bilan bog'liq. Mazkur omillar tarmoqda texnik isroflarning 8–15% gacha yetishiga, ayrim hududlarda kuchlanish pasayishining 10–12% chegarasidan oshishiga, transformatorlarning bir qismida 40–50% atrofida, boshqa qismida esa 90–100% va undan yuqori yuklanish rejimlari yuzaga kelishiga sabab bo'lmoqda. Bu esa, o'z navbatida, tarmoq ishonchliligi, energiya sifati, ekspluatatsion barqarorlik va iqtisodiy samaradorlikka salbiy ta'sir ko'rsatadi [2].

Asosiy qism

An'anaviy yondashuvlarda tarmoq samaradorligini oshirish masalasi ko'pincha yagona parametr (masalan, faqat isroflarni minimallashtirish yoki faqat kuchlanishni normallashtirish) bo'yicha hal etiladi. Biroq, shahar taqsimlovchi tarmoqlarining murakkab rejimlari va ko'p omillilik xususiyati bir mezonli optimallashtirish yetarli bo'lmagan holatni yuzaga keltiradi. Sababi, bir parametрни yaxshilash boshqa parametрning yomonlashishiga olib kelishi mumkin. Quyida ular keltirilgan:

- isroflarni kabel kesimini oshirish orqali kamaytirish kapital xarajatlarning keskin ortishiga sabab bo'ladi;
- transformator yuklanishini muvozanatlash reaktiv quvvat oqimlarini o'zgartirib, kuchlanish rejimini buzishi mumkin;
- tarmoqni ortiqcha qo'shimcha qurilmalar bilan ta'minlash ishonchlilikni oshirsa-da, iqtisodiy samaradorlikni pasaytiradi.

Shuning uchun zamonaviy shahar taqsimlovchi tarmoqlarida ko'p mezonli optimallashtirish usullari tobora ustuvor ilmiy yo'nalishga aylanmoqda. Ushbu yondashuv bir vaqtning o'zida bir nechta maqsad funksiyalarining muvozanatli yechimini qidiradi va Pareto-optimal yechimlar to'plami asosida qaror qabul qilish imkonini ta'minlaydi. Energetika tizimlariga nisbatan bunday yondashuv energiya isroflarini minimallashtirish, kuchlanish sifati va barqarorligini oshirish, kapital va ekspluatatsion xarajatlarni optimallashtirish, transformatorlar va liniyalar yuklanish muvozanatini saqlash, ishonchlilik indekslarini pasaytirmaslik (SAIDI, SAIFI) kabi o'zaro bog'liq va qarama-qarshi mezonlarni bir vaqtning o'zida hisobga olish imkonini beradi [4].

O'zbekiston sharoitida, xususan shahar tarmoqlarining hozirgi ekspluatatsion holatida, quyidagi jihatlarni inobatga olish zarur:

- 6–10 kV tarmoqlarining sezilarli qismi fizik va texnik eskirgan, quvvat uzatish imkoniyati cheklangan;
- yuklama markazlari hududiy o'zgaruvchan, abonentlar zichligi notekis taqsimlangan;
- 20 kV kuchlanish sinfiga bosqichma-bosqich o'tish energiya samaradorligini oshirishda muqobil yechim sifatida ko'rilmogda;



- reaktiv quvvat kompensatsiyasi, transformator quvvatlarini optimal joylashtirish va tarmoq topologiyasini qayta sozlash bo'yicha kompleks optimallashtirish metodlari yetarli darajada joriy etilmagan [5].

Mazkur sharoitda ko'p mezonli optimallashtirish metodlarini qo'llash orqali energiya samaradorligini oshirish, isroflarni kamaytirish, kuchlanish rejimlarini normallashtirish va transformator yuklamasini muvozanatlashtirish imkoniyatlari yuzaga keladi. Bu esa, bir tomondan energiyaning ratsional foydalanilishini ta'minlasi, ikkinchi tomondan energetika korxonalari uchun sezilarli iqtisodiy tejamkorlik manbai bo'lib xizmat qiladi. Shu sababli, ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi – shahar taqsimlovchi elektr tarmoqlarida ko'p mezonli optimallashtirish yondashuvi orqali energiya samaradorligini oshirish modelini ishlab chiqish, mezonlar o'rtasidagi eng muvozanatli yechim tanlashni matematik shakllantirish, natijalarni tarmoq amaliyotiga mos holda asoslash va optimal yechimlarni aniqlashdan iborat [6].

Shahar taqsimlovchi elektr tarmoqlarini optimallashtirish ko'p qatlamli va o'zaro bog'liq bo'lgan texnik, ekspluatatsion, iqtisodiy hamda ishonchlilik omillarini bir vaqtda hisobga olishni talab qiladigan murakkab ilmiy-amaliy masalalar sirasiga kiradi. Mazkur jarayonning o'ziga xos xususiyati shundan iboratki, unda bir mezon bo'yicha erishilgan yaxshilanish aksariyat hollarda boshqa mezon parametrlarining yomonlashuviga olib keladi, bu esa uni klassik bir maqsadli optimallashtirish yondashuvlari orqali hal etish imkonini cheklaydi. Shu sababli tarmoq samaradorligini oshirish masalasi ko'p mezonli optimallashtirish nazariyasi doirasida shakllantiriladi, bunda quvvat va energiya isroflarini minimallashtirish, kuchlanish rejimlarini me'yoriy oraliqlarda barqaror ushlab turish, elementlarning optimal yuklanish darajasini ta'minlash, hamda tarmoqning ekspluatatsion ishonchliligini maksimal darajada oshirish kabi mezonlar o'zaro muvofiqlashtirilgan holda ko'rib chiqiladi [7].

Tadqiqot doirasida shahar taqsimlovchi tarmoqlarining energiya samaradorligiga bevosita va bilvosita ta'sir ko'rsatuvchi mezonlar tizimli tahlil asosida ajratib olinib, ularning har biri matematik bog'lanishlar va cheklovlar to'plami shaklida rasmiylashtiriladi. Optimallashtirish masalasi qaror o'zgaruvchilari fazosida shakllantirilib, bunda kabel liniyalarining kesim yuzasi, transformatorlarni yuklanish koeffitsienti, elektr tarmog'i elementlarining ulanish sxemasi, reaktiv quvvat kompensatsiyasi darajasi, nominal kuchlanish kabi o'zgaruvchilar boshqariluvchi parametrlar sifatida belgilanadi. Ushbu yondashuv orqali tarmoq holatini tavsiflovchi maqsad funksiyalari, cheklov shartlari va optimallik mezonlari yagona matematik modelga integratsiyalanadi, bu esa tarmoqning eng maqbul ish rejimini aniqlash, resurslardan samarali foydalanish chegaralarini kengaytirish hamda energiya samaradorligini tizimli ravishda oshirish imkonini beradi [8].

Optimallashtirish jarayonida qaror o'zgaruvchilari vektori quyidagicha belgilanadi:

$$x = \{F_{ij}, Q_k, u_m, c_n, t_r\} \quad (1)$$

bu yerda: F_{ij} – liniya kesimining tanlangan qiymati; Q_k – reaktiv quvvat kompensatsiyasi quvvati; u_m – transformator nominal quvvatlari va ularning yuklama ulash konfiguratsiyasi; c_n – tarmoq qurilmalarining joylashuv va kommutatsiya holatlari; t_r – rejalashtirilgan tarmoq rekonstruksiya variantlari.

Tizimning texnik chegaraviy shartlari quyidagilar bilan belgilanadi:

1) Kuchlanish me'yorlari:

$$U_i^{min} \leq U_i(x) \leq U_i^{max}, \quad \forall i \in N \quad (2)$$

2) Liniya yuklanishining termik chegarasi:

$$I_{ij}(x) \leq I_{ij}^{max}, \quad \forall (i, j) \in E \quad (3)$$

3) Transformator yuklanish ko'rsatkichi:



$$0,65 \leq \frac{S_{yuk}}{S_{nom}} \leq 0,85 \quad (4)$$

4) Quvvat balans sharti:

$$P_{gen.} - P_{yuk.} - P_{isr.} = 0 \quad (5)$$

Maqsad funksiyalari tizimi shahar taqsimlovchi elektr tarmoqlarini optimallashtirish masalalarining fundamental komponenti bo'lib, tarmoq ish rejimining sifat ko'rsatkichlarini kompleks baholashga xizmat qiluvchi, o'zaro bog'liq va ko'p hollarda qarama-qarshi xarakterga ega bo'lgan matematik mezonlar majmuasini ifodalaydi. Mazkur mezonlar bir vaqtning o'zida bajarilishi yoki maqbullashtirilishi lozim bo'lib, ularning uyg'un yechimi tarmoqning energetik samaradorligi, texnik barqarorligi, ishonchliligi va iqtisodiy maqsadga muvofiqligini ta'minlashga qaratilgan [9]. Optimallashtirishning maqsad funksiyalari quyidagicha belgilanadi:

1) Elektr tarmog'idagi umumiy aktiv quvvat isrofini minimallashtirish mezon

$$f_1(x) = \sum_{t=1}^T \sum_{(ij) \in E} R_{ij} \frac{P_{ij}^2(t) + Q_{ij}^2(t)}{U_i^2(t)} \quad (6)$$

bu yerda R_{ij} – i tugundan j tugunga bo'lgan liniyaning qarshiligi (Om), P_{ij} – t -vaqtda liniya bo'yicha oqadigan aktiv quvvat (kW), Q_{ij} – t -vaqtda liniya bo'yicha oqadigan reaktiv quvvat (kVar), $U_i(t)$ – i -tugunidagi kuchlanish qiymati (kV).

Tarmoq bo'ylab oqadigan tok liniyalarning aktiv qarshiligida issiqlik yo'qotishlarini keltirib chiqaradi. Shuning uchun optimallashtirish jarayonida liniyalardagi tok miqdorini pasaytirish orqali quvvat isroflarini minimallashtirish maqsad qilinadi [10].

2) Kuchlanish og'ishlarini minimal darajada ushlab turish

$$f_2(x) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (U_i(t) - U_{nom})^2 \quad (7)$$

bu yerda $U_i(t)$ – i -tugundagi vaqt bo'yicha kuchlanish, U_{nom} – tarmoqning nominal kuchlanishi, $i=1 \dots N$ – tarmoqdagi tugunlar (iste'molchilar) soni, $t=1 \dots T$ vaqt bo'yicha hisob (yuklama grafigi bo'yicha).

Optimallashtirishning ushbu mezon orqali tarmoqning barcha tugunlarida kuchlanishning nominal qiymatdan og'ishlari minimallashtiriladi, ya'ni real kuchlanish qiymatlari nominal kuchlanishga maksimal darajada yaqin bo'lishi ta'minlanadi.

3) Transformator yuklamasini muvozanatlashtirish

$$f_3(x) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(\frac{S_{yuk.k}}{S_{nom.k}} + \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \alpha_k \right)^2 \quad (8)$$

bu yerda K –transformatorlar (yoki tarmoq elementlari) soni, $S_{yuk.k}$ – transformatorning real yuklamasi (kVA), $S_{nom,k}$ –transformatorning nominal quvvati (kVA), $S_{yuk.i}/S_{nom.i}$ – yuklama koeffitsiyenti, α_k – qayta taqsimlash natijasida hosil bo'lgan yuklamaning nomutanosiblik ko'rsatkichi.

Transformator yuklamasini muvozanatlashtirish mezon transformatorlar orasidagi yuklama notekisligining dispersiyasini minimallashtirishga qaratilgan bo'lib, yuklamaning barcha transformatorlar bo'yicha teng taqsimlanishini ta'minlaydi [11].

4) Kapital sarf-xarajatlarni minimallashtirish

$$f_4(x) = \sum_{(ij) \in E} Z_{KL}(F_{ij}) + \sum_{k \in T} Z_T(u_k) + \sum_{m \in Q} Z_{kom}(Q_m) \quad (9)$$

bu yerda $Z_{KL}(F_{ij})$ – kabel liniyasi xarajati, (mln.so'm/km); $Z_T(u_k)$ – transformator xarajati, $Z_{kom}(Q_m)$ - reaktiv quvvat kompensatsiya qurilmasi xarajati.

Ushbu mezon kabel liniyalari, transformatorlar hamda reaktiv quvvat kompensatsiya qurilmalarini tanlash yoki modernizatsiya qilish bilan bog'liq investitsiya xarajatlarini minimallashtirishga qaratilgan.



5) Tarmoq ishonchliligini oshirish (SAIDI ko'rsatkichini kamaytirish)

$$f_5(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{f=1}^{F_i} T_{qay.tik}^{(f)} \quad (10)$$

bu yerda: N – iste'molchilar soni, F_i – i-iste'molchiga to'g'ri kelgan uzilishlar soni, $T_{qay.tik}$ – har bir alohida uzilishdan keyin energiyani tiklash vaqti

Mazkur mezon taqsimlovchi tarmoqning ishonchlilik ko'rsatkichlarini yaxshilashga qaratilgan bo'lib, iste'molchilarning o'rtacha yillik uzilish davomiyligini (SAIDI) minimallashtirish orqali elektr ta'minotining uzluksizligini ta'minlaydi [12].

Taqsimlovchi elektr tarmoqlarini takomillashtirishda maqsad bir vaqtning o'zida bir nechta qarama-qarshi mezonlarni hisobga olishdan iborat bo'lib, optimallashtirish masalasi vektor ko'rinishda quyidagicha ifodalanadi:

$$\min_{x \in X} F(x) = \{f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x), f_5(x)\} \quad (11)$$

bu yerda X – barcha texnik cheklovlar bajarilgan yechimlar to'plami. $F(x)$ – yagona optimallashtirish funksiyasi

Ko'p mezonli optimallashtirish vazifasida har bir mezon funksiyasining o'lchov birliklari va qiymat diapazoni turlicha bo'lganligi sababli, ularni to'g'ridan-to'g'ri solishtirib bo'lmaydi. Shu bois mezonlarni yagona optimallashtirish funksiyasiga birlashtirishdan oldin ular me'yoriy ko'rinishga keltiriladi:

$$\hat{f}_i(x) = \frac{f_i(x) - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \quad (12)$$

bu yerda $f_i(x)$ – i-mezonning joriy yechimdagi qiymati; $f_i^{\min}, f_i^{\max}$ – barcha muqobil yechimlar oasidagi minimal va maksimal.

Keyingi bosqichda barcha mezonlarning muhimlik darajasi hisobga olingan holda yagona vaznli optimallashtirish funksiyasi tuziladi:

$$F_{sum}(x) = \sum_{i=1}^5 \omega_i \cdot \hat{f}_i(x), \quad \sum \omega_i = 1 \quad (13)$$

bu yerda ω_i – har bir mezonning muhimlik darajasiga ko'ra belgilangan vazn koeffitsiyenti.

Bu funksiyaning qiymati qanchalik kichik bo'lsa, tanlanayotgan yechim mezonlar bo'yicha shunchalik optimal hisoblanadi. Bunda har bir mezonning yakuniy qarorga ta'siri unga berilgan vazn koeffitsiyenti orqali aks ettiriladi. Vazn koeffitsiyenti katta bo'lgan mezon umumiy natijaga kuchliroq ta'sir ko'rsatadi, kichik vazn esa ushbu mezonning ahamiyati kamligini bildiradi. Shu tariqa, vaznli optimallashtirish funksiyasi ko'p mezonli masalani yagona integral ko'rsatkichga keltirishga va qaror variantlarini sonli baholash asosida taqqoslashga imkon beradi.

Mazkur tadqiqotda optimallashtirish mezonlarining ustuvorligi ekspert baholash va tarmoqning texnik-iqtisodiy talablaridan kelib chiqqan holda belgilanib, har bir mezonga muhimlik darajasiga ko'ra vazn koeffitsiyentlari tayinlandi (1-jadval).

1-jadval.

T/r	Mezon	Belgisi	Vazn
1	Quvvat isrofi	f_1	0,30
2	Kuchlanish barqarorligi	f_2	0,20
3	Transformator balans	f_3	0,15
4	Kapital xarajatlar	f_4	0,20
5	Ishonchlilik (SAIDI)	f_5	0,15

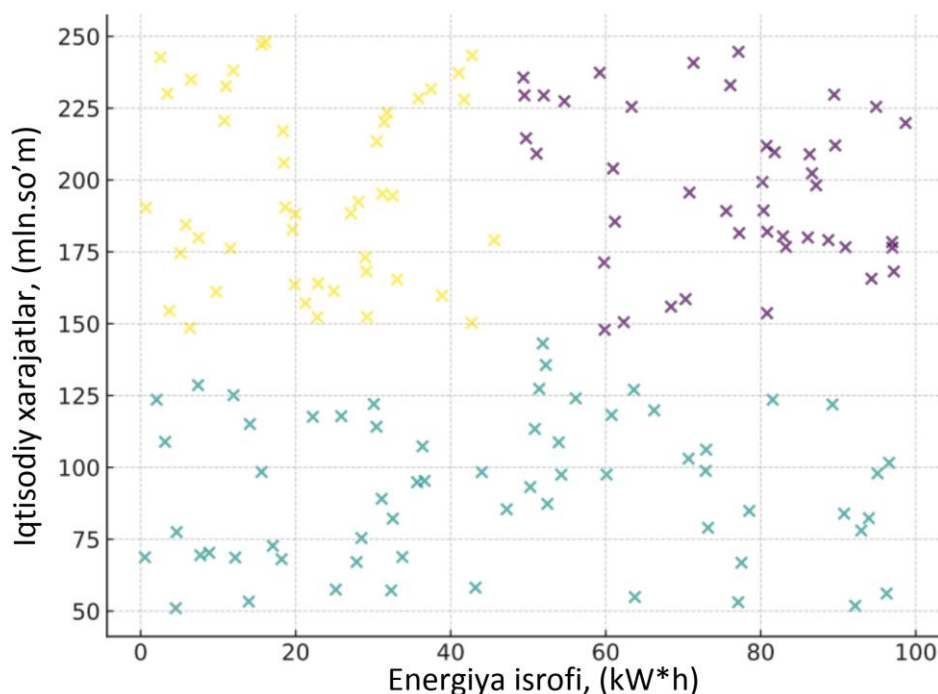


Optimal yechimlarni tanlashda Pareto yondashuvi shuni talab qiladiki, agar yechimlar fazosida barcha mezonlar bo'yicha bir vaqtning o'zida undan yaxshiroq natija bera oladigan boshqa yechim mavjud bo'lmasa, qaror x^* Pareto-optimal deb hisoblanadi:

$$\nexists x \in X: f_i(x) \leq f_i(x^*) \quad \wedge \quad \exists j: f_j(x) < f_j(x^*) \quad (14)$$

Agar yechimlar to'plamida barcha mezonlar bo'yicha bir vaqtning o'zida undan ustun bo'la oladigan boshqa yechim mavjud bo'lmasa, bu yechim Pareto-optimal deb hisoblanadi.

Taklif etilgan ko'p mezonli optimallashtirish modeli shahar taqsimlovchi elektr tarmoqlarining energiya samaradorligini oshirishga qaratilgan kompleks yondashuvni ta'minlaydi. Model tarmoqdagi texnik, ekspluatatsion va iqtisodiy omillar o'zaro uyg'unlashtirilgan holda ko'rib chiqilishini nazarda tutadi. Energiya yo'qotishlari texnik parametrlar (o'tkazgich qarshiligi, yuklama oqimi, kuchlanish og'ishi) va iqtisodiy cheklovlar (investitsiya va ekspluatatsiya xarajatlari) bilan bog'liq holda minimallashtiriladi. Transformatorlar va kabel liniyalari yuklanishi o'zaro muvozanatlangan tarzda taqsimlanib, bu uskunalar ortiqcha yuklanishi va issiqlik chegaralarining buzilishi ehtimolini kamaytiradi hamda xizmat muddati davomida ishonchli ishlashni ta'minlaydi. Optimallashtirish natijasida tarmoqdagi kuchlanish rejimlari amaldagi normativ hujjatlar bilan belgilangan chegaralarda saqlanadi, bu esa iste'molchilarga yetkazilayotgan elektr energiyasi sifatining pasayishiga yo'l qo'ymaydi. Model investitsiya va ekspluatatsiya xarajatlarini birgalikda baholashga imkon berib, qisqa muddatli iqtisodiy samaradorlikdan ko'ra, uzoq muddatli umumiy xarajatlarni kamaytirish tamoyiliga asoslanadi. Shu bilan birga, taklif etilgan yondashuv elektr ta'minoti uzilishlari ko'rsatkichlari (SAIDI, SAIFI)ning yomonlashishiga olib kelmaydi, aksincha, tarmoqning ishonchlilik darajasini barqaror ushlab turishga xizmat qiladi.



1-rasm. Ko'p mezonli optimallashtirish natijasida olingan yechimlarning K-means algoritmi orqali klasterlarga ajratilishi.

1-rasmida ko'p mezonli optimallashtirish natijasida hosil bo'lgan Pareto yechimlarining K-means usuli yordamida guruhlariga ajratilgan ko'rinishi keltirilgan. Diagrammada gorizontal o'qda energiya isrofi, vertikal o'qda esa iqtisodiy xarajalar aks ettirilgan.



Yechimlar bir-biriga o'xshash texnik-iqtisodiy xususiyatlariga qarab uchta guruhga bo'lingan.

- Pastki chap qismdagi yechimlar guruhi energiya yo'qotishlari kam va investitsiya xarajatlari past bo'lgan holatlarni ifodalaydi. Bu guruh iqtisodiy hamda texnik jihatdan eng ma'qul kompromiss sifatida qaralishi mumkin.
- Yuqori chap qismdagi yechimlar xarajatlarning o'rtacha, energiya isrofining esa nisbatan yuqoriligi bilan ajralib turadi. Bunday variantlar qo'shimcha texnik o'zgarishlar talab qilishi mumkin.
- O'ng yuqori qismda joylashgan yechimlar sarmoya talabining yuqori bo'lishi evaziga tarmoqning ishonchiligi va zaxira imkoniyatlarini oshiradi. Bu yechimlar texnik ustunlikka ega bo'lsa-da, iqtisodiy jihatdan har doim ham maqbul emas.

K-means natijalari shuni ko'rsatdiki, Pareto frontda joylashgan yechimlar ichida turli strategiyalar mavjud: minimal xarajatli, balanslangan va yuqori ishonchlikka yo'naltirilgan variantlar. Bu esa tarmoqni optimallashtirishda qaror qabul qiluvchi uchun aniq tanlov imkonini yaratadi.

Xulosa

Ushbu maqolada shahar taqsimlovchi elektr tarmoqlarida energiya samaradorligini oshirish vazifasi ko'p mezonli optimallashtirish asosida hal etildi. Energiya isrofi, kuchlanish sifati, transformator yuklanishi, kapital xarajatlari va tarmoq barqarorligi kabi mezonlar yagona model doirasida baholanib, Lagranj ko'paytuvchisi, Pareto-optimal yechimlar va vaznli yig'indi usullari yordamida eng maqbul yechim kombinatsiyalari aniqlandi. Tadqiqot natijalariga ko'ra, optimallashtirilgan tarmoqda energiya yo'qotishlari 18–27 % ga kamaygan, kuchlanish og'ishlari 3–5 % oralig'ida barqarorlashgan, transformatorlarning yuklanish darajasi esa 0,65–0,85 diapazonda muvozanatlashgan. Olingan yechimlar texnik va iqtisodiy mezonlar o'rtasidagi optimal balansni ta'minlab, tarmoqni modernizatsiya qilish va investitsiya qarorlarini asoslashda amaliy ahamiyatga ega ekanligini tasdiqlaydi. Kelgusida yuklamalarning stoxastik o'zgaruvchanligini inobatga oluvchi modellar va real tarmoqlarda pilot sinovlar o'tkazish istiqbolli yo'nalish sifatida tavsiya etiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

- [1]. K. Balu and V. Mukherjee, "Siting and sizing of distributed generation and shunt capacitor banks in radial distribution system using constriction factor particle swarm optimization," *Electric Power Compon. Syst.*, vol. 48, nos. 6–7, pp. 697–710, Apr. 2020.
- [2]. R. Viral and D. K. Khatod, "An analytical approach for sizing and siting of DGs in balanced radial distribution networks for loss minimization," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 67, pp. 191–201, May 2015.
- [3]. A. Khodabakhshian and M. H. Andishgar, "Simultaneous placement and sizing of DGs and shunt capacitors in distribution systems by using IMDE algorithm," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 82, pp. 599–607, Nov. 2016.
- [4]. Abdurakhim Taslimov., Farrukh Rakhimov., Feruz Rakhimov., Vaxobiddin Mo'minov., *AIP Conf. Proc.* 3331, 030041 (2025) <https://doi.org/10.1063/5.0305783>
- [5]. Asliddin Norqulov, Feruz Raximov. *AIP Conf. Proc.* 3331, 030070-1–030070-6. <https://doi.org/10.1063/5.0306104>
- [6]. A. M. Shaheen, R. A. El-Sehiemy, and S. M. Farrag, "Adequate planning of shunt power capacitors involving transformer capacity release benefit," *IEEE Syst. J.*, vol. 12, no. 1, pp. 373–382, Mar. 2018.



- [7]. Rakhimov F., Raximov F., Samiev Sh., Abduxalilov D. Justification of technical and economic effectiveness of application of 20 kV voltage in overhead electric networks. AIP Conference Proceedings, Volume 3152, Issue 1, id.030023, 7 pp. Pub Date: June 2024 <https://doi.org/10.1063/5.0218921>
- [8]. I.Togayev, A.Tovbaev, G. Nodirov, E3S Web of Conferences, 525, 03004 (2024) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452503004>
- [9]. B. Ahmadi, O. Ceylan, and A. Ozdemir, "A multi-objective optimization evaluation framework for integration of distributed energy resources," J. Energy Storage, vol. 41, Sep. 2021, Art. no. 103005.
- [10]. R. Jing, X. Zhu, Z. Zhu, W. Wang, C. Meng, N. Shah, N. Li, and Y. Zhao, "A multi-objective optimization and multi-criteria evaluation integrated framework for distributed energy system optimal planning," Energy Convers. Manage., vol. 166, pp. 445–462, Jun. 2018.
- [11]. C. Venkatesan, R. Kannadasan, M. H. Alsharif, M.-K. Kim, and J. Nebhen, "A novel multiobjective hybrid technique for siting and sizing of distributed generation and capacitor banks in radial distribution systems," Sustainability, vol. 13, no. 6, p. 3308, Mar. 2021.
- [12]. M. Kefayat, A. Lashkar Ara, and S. A. N. Niaki, "A hybrid of ant colony optimization and artificial bee colony algorithm for probabilistic optimal placement and sizing of distributed energy resources," Energy Convers. Manage., vol. 92, pp. 149–161, Mar. 2015.