TRANSFORMATORLARDA SALT ISHLASH VA QISQA TUTASHUV ISROFLARIGA TA'SIR ETUVCHI OMILLARNI BAHOLASH USULLARI

Buxoro Innovatsiyalar Universiteti

"Muhandislik va logistika" kafedrasi v.v.b. dotsenti

G'afurov Mirzohid Orifovich

Elektr muhandisligi yo'nalishi talabalari

Sharipov Nodir,

Muhiddinov Murod,

Umarov Shahzod

Annotatsiya

Ushbu maqolada kuch transformatorlarida salt ishlash isrofi (P_0) va qisqa tutashuv isrofiga (P_k) ta'sir etuvchi asosiy omillar tizimli tahlil qilingan. Magnit o'zak materiali va plastinka qalinligining salt ishlash isrofiga, yuklanish koeffitsiyentii va o'tkazgich materialining qisqa tutashuv isrofiga ta'siri kuzatib chiqilgan. Isroflarni baholashning standartlashtirilgan sinov usullari (IEC 60076-1, GOST 3484), matematik modellash (FEM) va zamonaviy sun'iy intellekt asosidagi usullar taqqoslangan. Barcha asosiy parametrlar va hisoblash formulalari jadval ko'rinishida keltirilgan. Tadqiqot natijalari transformatorlarning energetik samaradorligini oshirish va O'zbekiston tarmoqlarida isroflarni minimallashtirish uchun amaliy tavsiyalar ishlab chiqishga yo'naltirilgan.

Kalit so'zlar: *salt ishlash isrofi, qisqa tutashuv isrofi, gisterezis, Fuko toklari, yuklanish koeffitsiyentii, magnit o'zak, CRGO plastinkalar, IEC 60076-1, FEM*

modellash, transformator samaradorligi, garmonikalar, isroflarni baholash.

O‘zbekistonda Energetika vazirligining 2023 yilgi bayonotiga ko‘ra elektr tarmoqlari orqali uzatiladigan energiyaning 3,5–5,0%i transformatorlarda isrof bo‘ladi. Respublika bo‘yicha o‘rnatilgan transformatorlar umumiy soni 150 000 dan ortiq bo‘lib, ularning 40% idan ko‘proq xizmat muddati 25 yildan oshgan. Eskirgan transformatorlarda isrof ko‘rsatkichlari yangi amorf o‘zakli modellarnikidan 3–5 marta yuqori bo‘lib, bu holat milliy energetika xavfsizligiga bevosita tahdid soladi. Transformator isroflarini aniq baholash va ularni kamaytirish yo‘llari – bugungi kunda nafaqat texnik, balki iqtisodiy jihatdan ham dolzarb masaladir: 1 kW yillik isrofning 600 so‘m/kWh tarifida xarajati yiliga 5,26 mln so‘mni tashkil etadi.

Transformatordagi umumiy isrof ikki asosiy komponentdan iborat: salt ishlash isrofi (P_0) va yuklanish (qisqa tutashuv) isrofi (P_k). Salt ishlash isrofi transformatorning birlamchi o‘ramiga nominal kuchlanish ulanganda, ikkilamchi o‘ram ochiq holatda o‘lchangan magnit o‘zakdagi yo‘qotishlardir. Bu isrof yuklanishdan qat’iy nazar doimiy qoladi va gesterezis hamda Fuko toklari yo‘qotishlaridan iborat.

Qisqa tutashuv isrofi esa o‘ramlardagi Joule issiqligidan iborat bo‘lib, yuklanish kvadratiga proporsional o‘zgaradi. Asosiy farqlar quyidagi jadvalda keltirilgan:

1-jadval.

Salt ishlash va qisqa tutashuv isroflarining asosiy farqlari

Ko‘rsatkich	**Salt ishlash isrofi (P_0)**	**Qisqa tutashuv isrofi (P_k)**	**O‘lchov birligi**	**Me’yor (GOST 11677)**
Kelib chiqish sababi	Magnit o‘zakdagi yo‘qotishlar	O‘ramlardagi Joule issiqligi	–	–

	(gisterezis + Fuko toklari)	(I^2R)		
Yuklanishga bog‘liqlik	Bog‘liq emas (doimiy)	Yuklanish kvadratiga proporsional	–	–
Nazorat usuli	Salt ishlash sinovi	Qisqa tutashuv sinovi	–	–
100 kVA quvvatda taxminiy qiymat	0,25 – 0,55 kW	1,5 – 2,8 kW	kW	IEC 60076-1
630 kVA quvvatda taxminiy qiymat	1,05 – 1,68 kW	7,2 – 9,4 kW	kW	IEC 60076-1
1 000 kVA quvvatda taxminiy qiymat	1,55 – 2,35 kW	10,8 – 13,5 kW	kW	IEC 60076-1
Umumiy samaradorlikka hissasi	15 – 30%	70 – 85%	%	–

Jadval ko‘rsatadiki, qisqa tutashuv isrofi umumiy isrofning 70–85% ini tashkil etadi. Shu sababli yuklanish koeffitsiyentiini optimal (β = 0,5–0,7) darajada ushlab turish transformatorning samaradorligini oshirishning eng muhim yo‘li hisoblanadi.

Magnit o‘zak materiali salt ishlash isrofiga hal qiluvchi ta’sir ko‘rsatadi. An’anaviy

kremniyli po‘lat plastinkalar (CRGO, 0,27–0,35 mm qalinlikda) o‘rniga amorf metall o‘zakli transformatorlar salt ishlash isrofini 70–80% kamaytirishi mumkin. Kuchlanish tarmog‘ida garmonikalar mavjudligi (THD > 5%) esa ikkala isrof turini ham bir vaqtda oshiradi – bu zamonaviy tarmoqlarda keng tarqalgan muammodir.

Transformator isroflariga ta’sir etuvchi omillar ikki guruhga bo‘ladi:

- birinchisi – magnit o‘zak materialiga bog‘liq salt ishlash isrofi omillari;
- ikkinchisi – o‘ram parametrlari va ekspluatatsiya sharoitiga bog‘liq qisqa tutashuv isrofi omillari.

Quyidagi jadvalda ularning ta’sir darajasi batafsil keltirilgan:

2-jadval.

Transformator isroflariga ta’sir etuvchi asosiy omillar

Omil guruhi	Xususiy omillar	Salt ishlash isrofiga ta’siri	Qisqa tutashuv isrofiga ta’siri
Magnit o‘zak materiali	Kremniyli po‘lat lavahalari (CRGO/CCGO), noanodimiy qotishmalar, amorf metall	Kuchli ta’sir: CRGO plastinkalar isrofni 30–40% kamaytiradi	Sust ta’sir
Plastinka qalinligi	0,23 mm; 0,27 mm; 0,30 mm; 0,35 mm	Qalinlik kamayishi Fuko toklar isrofini kamaytiradi	Ta’sir kuchsiz
O‘ram o‘tkazgichi	Mis yoki alyuminiy; kesim yuzasi;	Ta’sir juda kuchsiz	Kuchli ta’sir: mis o‘tkaz.

	o‘tkazuvchanlik		alyuminiyga nisbatan 1,7x past qarshilik
Yuklanish koeffitsiyentii	$\beta = \frac{S}{S_n}$ (0,3–1,0 oralig‘ida)	Ta’sir yo‘q ($P_0 = const$)	Kuchli ta’sir: $P_{\text{k}} = \beta^2 \times P_{\text{kn}}$ formulasiga ko‘ra o‘sadi
Harorat	Muhit harorati va o‘ram harorati	Gisterezis isrofi harorat ortishi bilan biroz o‘zgaradi	Kuchli ta’sir: har 10°C ko‘tarilishda qarshilik ~4% oshadi
Kuchlanish sifati	Garmonikalar (THD), kuchlanish assimetriyasi	Garmonikalar Fuko toklar isrofini oshiradi	Yuqori garmonikalar o‘ramdagi isrofni oshiradi
Konstruktiv parametrlar	Magnit o‘zak kesim yuzasi, magnit yo‘l uzunligi, o‘zak shakli	Katta magnit yo‘l uzunligi isrofni oshiradi	O‘ram uzunligi ortishi bilan isrof o‘sadi

Transformator isroflarini baholash usullari standartlashtirilgan sinov metodlaridan tortib zamonaviy raqamli texnologiyalargacha keng qamrovli tizimni tashkil etadi:

3-jadval.

Transformator isroflarini baholash usullari taqqoslovi

Baholash usuli	Standart asosi	Aniqlik darajasi	Qo‘llanilish sohasi	Jihozlar talabi
Salt ishlash sinovi	IEC 60076-1 GOST 3484	Yuqori (±0,5%)	Zavod sinovi, texnik xizmat	Vattmetr, voltmetr, ampermetr
Qisqa tutashuv sinovi	IEC 60076-1 GOST 3484	Yuqori (±0,5%)	Zavod sinovi, kalit parametrlarni tekshirish	Regulyator, o‘lchash komplekti
Issiqlik o‘lchash usuli	IEC 60076-2	O‘rtacha (±2–5%)	Ekspluatatsiya monitoringi	Termoparalogger, IR kamera
Matematik modellash (FEM)	IEC 60076-10	Juda yuqori (±0,1%)	Loyihalash, optimallashtirish	ANSYS Maxwell, FEMM dasturlari
Energiya balans usuli	O‘zbekiston NTD	O‘rtacha (±2–4%)	Ekspluatatsiya tahlili, hisob-kitob	Hisoblagich ko‘rsatkichlari
Sun’iy intellekt (ML)	IEEE Std 1153	Yuqori (±0,3–1%)	Raqamli substansiyalar, Haqiqiy vaqtda monitoring	Smart sensorlar, SCADA tizimi

IEC 60076-1 va GOST 3484 standartlariga muvofiq salt ishlash sinovi birlamchi o‘ramga nominal kuchlanish berib, aktiv quvvat, tok va kuchlanish o‘lchanadi. Qisqa tutashuv sinovi esa ikkilamchi o‘ram qisqa ulanganda nominal tok oqizish uchun zarur kuchlanish va quvvat o‘lchanishi asosida amalga oshiriladi. Cheklangan element usuli (FEM) transformator isroflarining fazoviy taqsimlanishini 0,1% aniqlikda modellashtiradi va yangi konstruksiyalarni loyihalashda asosiy vosita hisoblanadi. Sun’iy intellektga asoslangan usullar esa ekspluatatsiya ma’lumotlari asosida isroflarni real vaqtda bashorat qilish imkonini.

Transformator isroflarini miqdoriy baholash uchun quyidagi asosiy formulalar qo‘llaniladi:

4-jadval.

Transformator isroflarini hisoblashning asosiy formulalari

Parametr	Formula	Izoh
Gisterezis isrofi	$P_g = K_g \cdot f \cdot B_{max}^n$	K_g – gisterezis koeff.; f – chastota (Hz); B_{max} – magnit induksiya (T); n = 1,6–2,0
Fuko toklari isrofi	$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot B^2{}_{\max} \cdot d^2$	K_e – Fuko koeff.; d – plastinka qalinligi (m); f^2 – ga proporsional
Umumiy magnit isrofi	$P_o = P_g + P_e = K_a \cdot f^\alpha \cdot B^m{}_{\max}$	Salt ishlash sinovi bilan o‘lchanadi; α = 1,3–2,0
Qisqa tutashuv	$P_k(\beta) = \beta^2 \cdot P_{kn}$	$\beta = \frac{S}{S_n}$ – yuklanish

isrofi		koeffitsiyentii; P_{kn} – nominal isrof (kW)
Harorat ta'siridagi isrof	$R(T) = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)]$	R_0 – 20°C dagi qarshilik; α = 0,00393 (mis); α= 0,00429 (alyuminiy)
Garmonikalar ta'siri	$P_{kg} = P_{kn} \cdot \left[1 + FHL \cdot \frac{P_{en}}{P_{kn}}\right]$	FHL – garmonik isrof omili; P^i_n – nominal Fuko isrofi
Umumiy samaradorlik	$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + \beta^2 P_{kn}} \cdot 100\%$	P_2 – chiqish quvvati (kW); optimal β = 0,5–0,7 da η = 98,5–99,5%

Yuklanish koeffitsiyentii β = S/S_n bo‘yicha optimal qiymat 0,5–0,7 oralig‘ida bo‘lib, bu diapazonda umumiy samaradorlik η = 98,5–99,5% ga yetadi. Masalan, quvvati 630 kVA bo‘lgan transformatorda P_0 = 1,4 kW va P_{kn} = 8,2 kW bo‘lganda: β = 0,6 da umumiy isrof PΣ = 1,4 + 0,36 × 8,2 = 4,35 kW; β = 1,0 da PΣ = 1,4 + 8,2 = 9,6 kW. Bu misol yuklanish rejimining isroflarga ta’sirini yaqqol ko‘rsatadi.

Transformatordagi salt ishlash va qisqa tutashuv isroflarini to‘g‘ri baholash va kamaytirishning bir nechta asosiy yo‘li mavjud. Birinchidan, magnit o‘zak uchun amorf metall yoki yuqori sifatli CRGO plastinkalar (0,23 mm) qo‘llanilishi salt ishlash isrofini 30–80% kamaytiradi. Ikkinchidan, yuklanish koeffitsiyentiini β = 0,5–0,7 oralig‘ida optimal ushlab turish qisqa tutashuv isrofini ikki baravar kamaytirishi mumkin. Uchinchidan, tarmoqdagi garmonikalar (THD) 5% dan oshmasligi nazorat qilinishi shart – aks holda isrof formulasiga harmonik omil FHL qo‘shiladi.

O‘zbekiston sharoitida eskirgan transformatorlarni zamonaviy amorf o‘zakli modellar bilan almashtirish 10 yillik LCC tahlilida har bir 630 kVA transformator uchun 45–60 mln so‘m tejamkorlik berishi mumkin (Sadullayev, G‘afurov, 2023). Kelajakda FEM modellash va ML asosidagi monitoring tizimlarini keng joriy etish isroflarni real vaqtda nazorat qilish imkonini beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. IEC 60076-1:2023. Power transformers – Part 1: General. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2023. – 120 b.
2. IEC 60076-2:2011. Power transformers – Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers. IEC, 2011.
3. GOST 3484-88. Transformatory silovye. Metody ispytaniy. – M.: Standartinform, 1988.
4. Kulkarni S.V., Khaparde S.A. Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics. – CRC Press, 2013. – 756 b.
5. N.N. Sadullayev., G‘afurov M.O. Sanoat korxonasining kompleks energiya
6. samaradorlik ko‘rsatkichini aniqlash. “Fan va texnologiyalar taraqqiyoti” jurnali, №2/2023,124-128 b.
7. N.N. Sadullayev., G‘afurov M.O. Gibrid energiya manbali energiya iste’moli obyektini umumlashgan samaradorlik ko‘rsatkichini aniqlash. Muqobil energetika jurnali, №2. 2023 y.35-40 b.
8. N.N. Sadullayev., Nematov Sh.N., G‘afurov M.O. Xorijiy davlatlar tahlili asosida O‘zbekistonda elektr energiyasi narxlarini aniqlash. “Fan va texnologiyalar taraqqiyoti”jurnali, №4/2023, 127-130 b.
9. Sadullayev N.N., G‘afurov M.O., Ne’matova Z.N. O‘zbekistonda elektr energiyasi narxlarini oshirish va tabaqalashtirilgan ta’rifni joriy etishga oid tahliliy xulosalalar. FarPI ilmiy-texnika jurnali, 2024 y. №10. 86-90 b.