УДК 621.331:621.311

В. Г. КУЗНЕЦОВ (ДІІТ)

ПРО КОЕФІЦІЄНТ ЗАВАНТАЖЕННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ЗАЛІЗНИЦЬ

Запропоновано критерій і метод визначення оптимальних коефіцієнтів завантаження силових трансформаторів тягових підстанцій залізниць.

Предложены критерий и метод определения оптимальных коэффициентов загрузки силовых трансформаторов тяговых подстанций железных дорог.

The author has proposed the criterion and method of determination of optimum load factors of power transformers of railway traction substations.

Вступ

Сучасний залізничний транспорт – це високотехнологічний механізм із значним споживанням енергоресурсів для забезпечення своєї господарської діяльності. Щорічно залізницями України споживається значна кількість дизпалива, електроенергії, газу, вугілля, мазуту топкового та інших видів ПЕР. В умовному обчисленні це складає 3250...3350 тис. туп. Близько 60 % з усіх видів енергоресурсів припадає на електроенергію.

Найбільш ефективними енергозберігаючими заходами по господарствах електропостачання за останні роки є такі:

- повернення електроенергії рекуперативного гальмування в первинну мережу;
- відключення з роботи по одному тяговому агрегату або тяговому трансформатору залежно від поїзної ситуації на тягових підстанціях;
- впровадження економічних світильників, ламп та автоматів керування зовнішнім освітленням;
- впровадження перетворювальних агрегатів з 12-пульсними випрямлячами на тягових підстанціях постійного струму;
- впровадження автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії на залізницях України;
- впровадження пристроїв компенсації реактивної потужності в тяговій мережі.

Важливою складовою енергозбереження в господарствах електрифікації та електропостачання залізниць України виступає винайдення раціональних режимів роботи енергетичного обладнання. В зв'язку з цим постає задача визначення раціональних коефіцієнтів завантаження силових трансформаторів.

Основна частина

Для підрахунку втрат електроенергії в 3-обмоточному трансформаторі необхідні наступні дані [1]:

а) паспортні або каталожні

- номінальна потужність трансформатора $S_{н}$, кВА;

- потужність обмоток ВН, СН, НН – $S_{вн}$, $S_{сн}$, $S_{нн}$, кВА (в паспорті або каталозі дана у відсотках до номінальної потужності);

- втрати потужності в міді обмоток ВН, СН, НН при повному їхньому завантаженні $\Delta P_{вн}$, $\Delta P_{сн}$, $\Delta P_{нн}$, кВт;

- струм холостого ходу трансформатора $I_{х.х.}$, %;

- втрати реактивної потужності трансформатора при холостому ході, кВАр

$$\Delta Q_{х.х} = S_{н} \cdot I_{хх} /100; \qquad (1)$$

- напруга короткого замикання кожної з обмоток тр-ра, %

$$U_{вк} = 0,5 \cdot (U_{вн\text{-}сн} + U_{вн\text{-}нн} - U_{сн\text{-}нн}), \qquad (2)$$

$$U_{ск} = 0,5 \cdot (U_{вн\text{-}сн} + U_{сн\text{-}нн} - U_{вн\text{-}нн}), \qquad (3)$$

$$U_{нк} = 0,5 \cdot (U_{вн\text{-}нн} + U_{сн\text{-}нн} - U_{вн\text{-}сн}), \qquad (4)$$

де $U_{вн\text{-}сн}$, $U_{сн\text{-}нн}$, $U_{вн\text{-}нн}$ беруться з паспорта чи каталогу;

- реактивна потужність, що споживається обмотками ВН, СН, НН трансформатора при повному навантаженні, кВАр

$$\Delta Q_{вн} = S_{вн} \cdot U_{вк} /100, \qquad (5)$$

$$\Delta Q_{вн} = S_{сн} \cdot U_{ск} /100, \qquad (6)$$

$$\Delta Q_{нн} = S_{нн} \cdot U_{нк} /100, \qquad (7)$$

б) споживання активної ($WP_{вн}$, $WP_{сн}$, $WP_{нн}$), кВт·год та реактивної ($WQ_{вн}$, $WQ_{сн}$, $WQ_{нн}$), кВАр·г електроенергії, що пройшла за розрахунковий період через обмотки відповідно високої, середньої та низької напруги трансформатора. При визначенні по показниках розрахункових лічильників на стороні середньої та низької напруги трансформатора

$$WP_{вн} = WP_{сн} + WP_{нн},$$

$$WQ_{вн} = WQ_{сн} + WQ_{нн};$$

в) кількість годин роботи трансформатора в розрахунковий період (календарне число годин) $T_п$;

г) кількість годин роботи трансформатора під навантаженням в розрахунковий період – $T_р$.

При обчисленні втрат електроенергії в трансформаторі послідовно визначаються:

а) фактична потужність кожної обмотки трансформатора за даними фактичного споживання активної та реактивної електроенергії за розрахунковий період, кВА

$$S_{фвн} = \sqrt{P^2_{фвн} + Q^2_{фвн}}; \quad (8)$$

$$S_{фсн} = \sqrt{P^2_{фсн} + Q^2_{фсн}}; \quad (9)$$

$$S_{фнн} = \sqrt{P^2_{фнн} + Q^2_{фнн}}, \quad (10)$$

де

$$P_{фвн} = WP_{ф\,вн} / T_р = $$

$$= (WP_{фсн} + WP_{фнн}) / T_р; \quad (11)$$

$$Q_{фвн} = WQ_{ф\,вн} / T_р =$$

$$= (WQ_{фсн} + WQ_{фнн}) / T_р; \quad (12)$$

$$P_{фсн} = WP_{фсн} / T_р; \quad (13)$$

$$Q_{фсн} = WQ_{фсн} / T_р; \quad (14)$$

$$P_{фнн} = WP_{фнн} / T_р; \quad (15)$$

$$Q_{фнн} = WQ_{фнн} / T_р; \quad (16)$$

б) коефіцієнт завантаження кожної з обмоток трансформатора

$$k_{з\,вн} = S_{ф\,вн} / S_{н\,вн}; \quad (17)$$

$$k_{з\,сн} = S_{ф\,сн} / S_{н\,сн}; \quad (18)$$

$$k_{з\,нн} = S_{ф\,нн} / S_{н\,нн}, \quad (19)$$

де $S_{вн}$, $S_{сн}$, $S_{нн}$ – номінальна потужність обмоток високої, середньої та низької напруги трансформатора, кВА;

в) втрати активної електроенергії, кВт·год:

$$\Delta WP = \Delta P_{х.х.} \cdot T_п + (\Delta P_{вн} \cdot k_{з\,вн}{}^2 +$$

$$+ \Delta P_{сн} \cdot k_{з\,сн}{}^2 + \Delta P_{нн} \cdot k_{з\,нн}{}^2) \cdot T_р; \quad (20)$$

г) втрати реактивної електроенергії, кВАр·г:

$$\Delta WQ = \Delta Q_{х.х.} \cdot Т_п + (\Delta Q_{вн} \cdot k_{з\,вн}{}^2 +$$

$$+ \Delta Q_{сн} \cdot k_{з\,сн}{}^2 + \Delta Q_{нн} \cdot k_{з\,нн}{}^2) \cdot T_р. \quad (21)$$

Втрати активної електроенергії як у самому трансформаторі, так і створювані ним в елементах системи електропостачання (від генераторів електростанцій до даного трансформатора) залежно від реактивної потужності, споживаної трансформатором, можна визначити за виразом [3]:

$$\Delta WP' = \Delta P'_{х.х.} \cdot T_п + (\Delta P'_{вн} \cdot k_{з\,вн}{}^2 +$$

$$+ \Delta P'_{сн} \cdot k_{з\,сн}{}^2 + \Delta P'_{нн} \cdot k_{з\,нн}{}^2) \cdot T_р, \quad (22)$$

де $\Delta P'_{хх} = \Delta P_{хх} + k_{зв} \cdot \Delta Q_{хх}$ – приведені активні втрати потужності холостого ходу;

$k_{зв}$ – коефіцієнт зміни втрат або економічний еквівалент реактивної потужності, що характеризує активні втрати від джерела живлення до трансформатора, що доводяться на 1 квар реактивної потужності, кВт/квар (значення коефіцієнта $k_{зв}$ наведені в табл. 1 [3]);

де $\Delta P'_{вн} = \Delta P_{вн} + k_{зв} \cdot \Delta Q_{вн}$,

$\Delta P'_{сн} = \Delta P_{сн} + k_{зв} \cdot \Delta Q_{сн}$, $\Delta P'_{нн} = \Delta P_{нн} + k_{зв} \cdot \Delta Q_{нн}$

– приведені активні втрати потужності при повному завантаженні трансформатора для обмоток ВН,СН, НН відповідно.

В умовах експлуатації оптимальним коефіцієнтом завантаження вважають такий, який забезпечує максимальний приведений ККД. Для двохобмоточних трансформаторів цей вираз буде наступним:

$$k_{зопт} = \sqrt{\frac{\Delta P'_х}{\Delta P'_к}}. \quad (23)$$

Однак, в умовах експлуатації не завжди можливо регулювати навантаження трансформатора для одержання оптимального коефіцієнта

завантаження, оскільки навантаження залежить від умов технологічного процесу виробництва. Розрахунки, проведені на кафедрі «Електропостачання залізниць», показали, що коефіцієнти завантаження трансформаторів, розраховані по мінімуму приведених втрат потужності, мають низьке значення. Так, для трансформаторів типу ТМ потужністю 630…16000 кВ·А при $\kappa_{зв}$ = = 0,07 кВт/квар коефіцієнт завантаження дорівнює 0,4…0,5. На підставі цих розрахунків було запропоновано при виборі оптимальної потужності трансформаторів, їх раціональних коефіцієнтів завантаження використовувати основний економічний критерій, а саме мінімум приведених річних витрат.

Таблиця 1

Коефіцієнт зміни втрат $k_{зв}$ у трансформаторах

Характеристика трансформатора й системи електропостачання	$k_{зв}$, кВт/квар	
	у години максимуму енергосистеми	у години мінімуму енергосистеми
Трансформатори, що живляться безпосередньо від шин електростанцій	0,02	0,02
Сітьові трансформатори, що живляться від електростанцій на генераторній напрузі	0,07	0,04
Понижувальні трансформатори 110/35/10 кВ, що живляться від районних мереж	0,1	0,06
Понижувальні трансформатори 6 — 10/0,4 кВ, що живляться від районних мереж	0,15	0,1

Застосування цього критерію дозволяє, з огляду на ефективність капіталовкладень у трансформатори, з одного боку, уникнути зайвих втрат електроенергії, а з іншого боку – перевитрат матеріальних цінностей і трудових витрат. При цьому умови експлуатації найвигіднішим чином сполучаються з параметрами трансформаторів.

Приведені витрати на один силовий трансформатор тягової підстанції залежно від навантаження можуть бути отримані за виразом:

$$З_{1т} = k_{н} \cdot K + (\Delta P'_{х} + k^2_{звн} \cdot \Delta P'_{вн} + k^2_{зсн} \times$$

$$\times \Delta P'_{сн} + k^2_{знн} \cdot \Delta P'_{нн}) \cdot T_{п} \cdot c_{е}, \qquad (24)$$

де $k_{н} = k_{е} + k_{а}$ – нормативний коефіцієнт; $k_{е}$ – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, $k_{е}$ = 0,15; $k_{а}$ – нормативний коефіцієнт амортизаційних відрахувань; $k_{а}$ = = 0,06; K – одноразові капітальні вкладення в один трансформатор; $c_{е}$ – вартість (тариф) 1 кВт·год електроенергії.

Методика техніко-економічних розрахунків, за оцінками фахівців, повинна бути переглянута.

З метою зіставлення трансформаторів різної потужності, у розрахунках кафедри «Електропостачання залізниць» використалися питомі приведені витрати, віднесені до переданої потужності S:

$$p_{1т} = \frac{З_{1т}}{S}. \qquad (25)$$

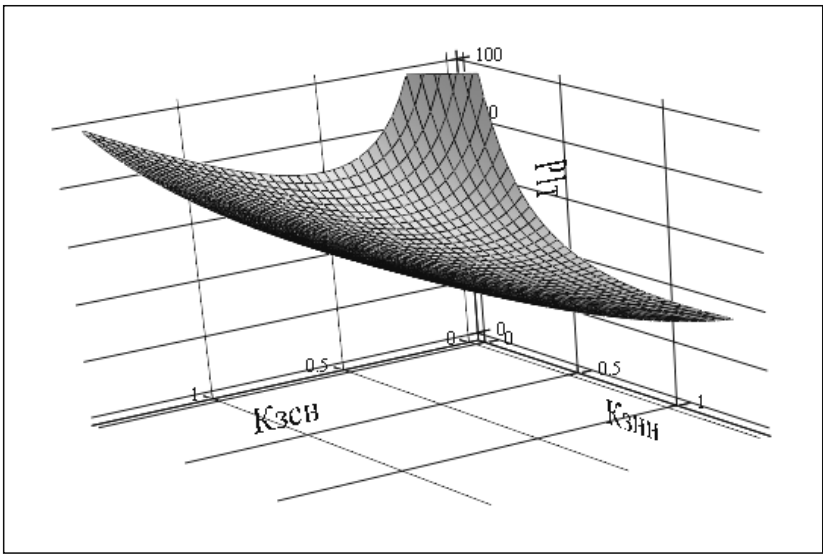
Аналіз залежностей питомих приведених витрат (25) від коефіцієнтів завантаження трансформаторів типу ТМ потужністю 630…16000 кВА показав, що питомі приведені витрати різко зростають при коефіцієнтах завантаження, менших 0,6. При $k_{з} > 0,6$ питомі приведені витрати збільшуються незначно.

На підставі останнього виразу можна отримати оптимальний коефіцієнт завантаження, що відповідає мінімуму приведених витрат:

$$k_{з.опт} = \sqrt{\frac{\Delta P'_{х}}{\Delta P'_{к}} + \frac{k_{н} \cdot K}{c_{е} \cdot T_{п} \cdot \Delta P'_{к}}}. \qquad (26)$$

Коефіцієнт завантаження, розрахований за останнім виразом, більше, ніж коефіцієнт завантаження, що відповідає мінімуму витрат. Для будь-якого типорозміру трансформатору коефіцієнт завантаження, розрахований за мінімумом приведених витрат, збільшується при зменшенні вартості 1 кВт·год електроенергії. Зі збільшенням номінальної потужності трансформатора оптимальний коефіцієнт завантаження при одній і тій самій вартості електроенергії зменшується.

На рис. 1 наведена залежність питомих приведених витрат силового трьохобмоткового трансформатора , побудована за формулою (25) за даними Львівської залізниці.



s

Рис. 1. Графік залежності приведених витрат силових трансформаторів тягових підстанцій від коефіцієнтів завантаження обмоток середньої та низької напруги

Висновок

Для вибору оптимальної потужності трансформатора, раціонального коефіцієнта завантаження потрібно користуватись критерієм мінімуму приведених річних витрат. При цьому оптимальний коефіцієнт завантаження обернено пропорційно залежить від вартості 1 кВт·год електроенергії і від номінальної потужності трансформатора.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. ГНД 34.09.203-2004 «Нормування витрат електроенергії на власні потреби підстанцій 35-750 кВ і розподільчих пунктів 6-10 кВ. Інструкція» [Текст].
2. Інструкція з нормування витрат електроенергії на власні потреби підстанцій 6-220 кВ і розподільчих пунктів 6-10 кВ залізниць України [Текст] : Затв.: Наказ № 526-Ц від 08.11.2007 р.
3. Киреева, Э. А. Рациональное использование электроэнергии в системах промышленного электроснабжения [Текст] / Э. А. Киреева. – М.: Энергетик, 2000. – 74 с.

Надійшла до редколегії 18.03.2009.