

## MINIMAL LOSS OF ELECTRICAL ENERGY IN THE OPERATION PROCESS OF A POWER TRANSFORMER

*Ilian Iliev, Desislava Delcheva, Rosen Jordanov*

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: [ilian.iliev@mgu.bg](mailto:ilian.iliev@mgu.bg); [desi.delcheva@mgu.bg](mailto:desi.delcheva@mgu.bg); [rosen.yordanov@mgu.bg](mailto:rosen.yordanov@mgu.bg)

**ABSTRACT.** Possibilities for optimising the operating modes of a power transformer are presented. An economically expedient mode of operation of the power transformer is determined. This is such a mode of parallel operation of a power transformer, where the number of included transformers is determined by the condition of the smallest power loss under a variable load. Minimal loss of electrical energy in the process of operation of the power transformer is considered. The main indicator characterising the efficient operation of the power transformer is the efficiency factor (efficiency). It plays an important role in regulating an economically expedient mode of operation.

**Key words:** minimal loss, electrical energy, power transformer.

### МИНИМАЛНИ ЗАГУБИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ В ПРОЦЕСА НА ЕКСПЛОАТАЦИЯ НА СИЛОВ ТРАНСФОРМАТОР

*Илиян Илиев, Десислава Делчева, Росен Йорданов*

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

**РЕЗЮМЕ.** В статията са представени възможности за оптимизиране режимите на работа на силов трансформатор. Определен е икономически целесъобразен режим на работа на силовия трансформатор. Това е такъв режим на паралелна работа, при който броят на включените трансформатори се определя от условието за най-малки загуби на мощност при променлив товар. Разгледани са минимални загуби на електрическа енергия в процеса на експлоатация на силовия трансформатор. Основен показател, характеризиращ ефективната работа на силовия трансформатор, е коефициентът на полезно действие (к.п.д.). Той играе важна роля при регулиране на икономически целесъобразен режим на работа.

**Ключови думи:** минимални загуби, електрическа енергия, силов трансформатор.

### Въведение

Минимум на приведени и годишни разходи, този критерий е свързан най-вече с броя на силовите трансформатори. Основен начин за постигане на минимални загуби на електрическа енергия (ЕЕ) е икономически целесъобразният режим на работа (ИЦРР) на силов трансформатор (СТ). Това е такъв режим на паралелна работа на СТ, при който броят на включените трансформатори се определя от условието за най-малки загуби на мощност, при променлив товар.

### Изложение

Активните загуби на мощност при силов трансформатор се определят от израза:

$$\Delta P' = \Delta P'_0 + \beta^2 \Delta'_k \quad (1)$$

където:

- $\Delta P'_0 = \Delta P_0 + k_e Q_0$  и  $\Delta P'_k = \Delta P_k + k_e Q_k$  са приведени активни загуби на празен ход и загуби на късо съединение в kW;

- $\beta = S/S_{HT}$
- $k_e$  – икономически еквивалент на реактивната мощност, който означава намаляване на загубите на активна мощност във всички звена на ЕСС (от захранващия източник до консуматора), вследствие на намаляването на предаваната реактивна мощност.

Най-малката стойност  $k_e \approx 0,02$  [kW/kVA<sub>r</sub>] е за СТ, захранвани непосредствено от шините на генериращия източник;  $\Delta Q_0 = S_{HT} \cdot 10 \cdot 10^{-2}$  [kVA<sub>r</sub>] (1) – реактивна мощност при празен ход на СТ;  $\Delta Q_k = S_{HT} \cdot U_k \cdot 10^2$  [kVA<sub>r</sub>] (2) – реактивната мощност от опита на късо съединение на СТ при номинален товар (Лаков, Георгиев, 2013);  $l_0$  [%] – ток на празен ход;  $U_k$  [%] – напрежение на късо съединение.

При разделна и паралелна работа на силов трансформатор, може да се определят коефициентите  $\beta_{ик}$ , за най-икономичен режим на работа. В таблица 1 са показани изчислени  $\beta_{ик}$  за определени СТ (Федеров, 1957).

Обикновено, силов трансформатор в цехова подстанция и главна понижавача подстанция работят разделно, което е от значение при избора на комутационно-защитна апаратура на страна ниско напрежение (Джустров и др., 2019), по комутационни способности и динамична

устойчивост. Паралелната работа се оказва целесъобразна в следните случаи:

1) при хранване на ударни, рязкопроменливи товари (прокатни станове, ел. пещи, заваръчни агрегати и др.) (Ермилов, 1976);

2) Когато, при разделна работа, АВР не обезпечава необходимото бързодействие на възстановяване на хранването при самопускане на АД (Джустров, 2019);

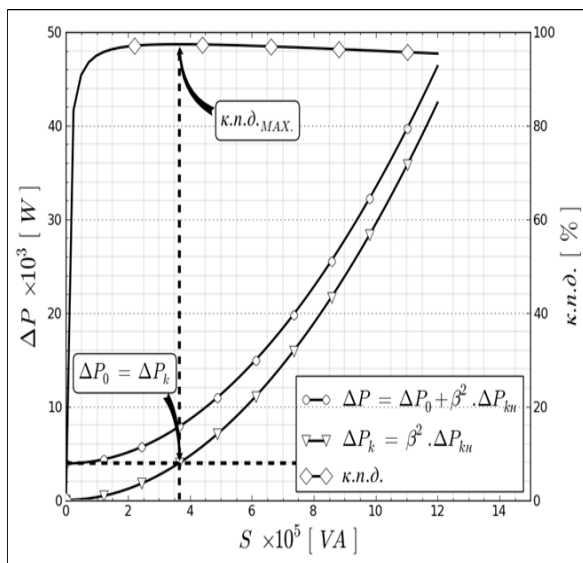
3) съществува вероятност за несинхронно включване, при действие на АВР (например, при съществуване на заводска ТЕЦ) .

Таблица 1. Стойности на  $\beta_{ик}$  за СТ при различни  $k_e$

Тип и мощност на СТ	Стойност на $\beta_{ик}$ при $k_e$		
	$k_e=0,02$	$k_e=0,04$	$k_e=0,1$
ТМ 100/6	0,53	0,57	0,65
ТМ 320/6	0,55	0,59	0,67
ТМ 560/6	0,56	0,6	0,69
ТМ 560/35	0,64	0,67	0,73
ТМ 750/6	0,62	0,66	0,73
ТМ 1 000/35	0,62	0,64	0,7
ТМ 1 800/35	0,62	0,64	0,7
ТМ 3 200/35	0,59	0,61	0,66
ТМ 5 600/35	0,59	0,62	0,66
ТМ 7 500/35	0,58	0,6	0,62
ТМ 10 000/35	0,57	0,58	0,59
ТМ 16 000/110	0,58	0,59	0,69
ТМ 25 000/110	0,59	0,60	0,73
ТМ 40 000/110	0,59	0,64	0,70

### Икономически целесъобразен режим на работа при експлоатация на един силов трансформатор

Основен показател, характеризиращ ефективната работа на СТ, е коефициентът на полезно действие (к.п.д.). Той играе важна роля при регулиране на ИЦРР. Понастоящем се произвеждат СТ с кпд  $\eta$  до 99%, т.е. общите загуби могат да се сведат до 1%.



Фиг. 1. КПД при работа на един силов трансформатор.

От фиг. 1 се вижда, че максимален к.п.д.  $\eta_{max}$  ще имаме при такъв товар на СТ, когато  $\Delta P_0$  и  $\Delta P_k$  се изравнят, т.е.  $\Delta P_0 = \Delta P_k$ . За по-голямата част произвеждани у нас СТ  $\Delta P_0 = (1/2 \div 1/3) \Delta P_k$ . Ако се приеме, че  $\Delta P_0 = 0.5 \Delta P_k$ , може да се запише:

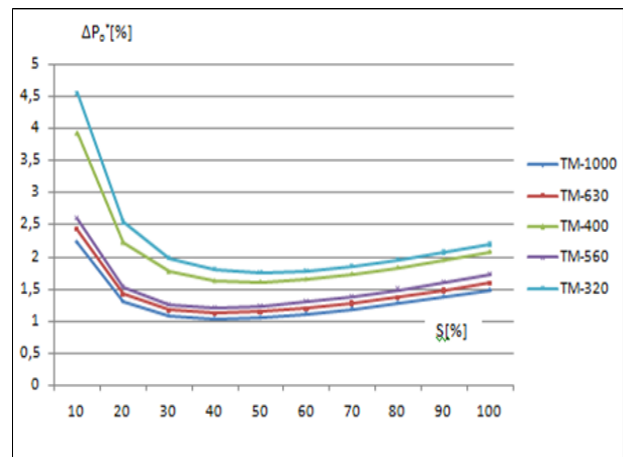
$$0,5P_k = \beta^2 \Delta P_k; \beta^2 = 0,5; \beta = \sqrt{0,5} = 0,71 \quad (2)$$

При конструиране на СТ за работа с големи  $\beta$ , съотношението на  $\Delta P_0$  и  $\Delta P_k$ , така трябва да се подбере, че точката за максималния к.п.д.  $\eta_{max}$  да бъде в областта на големите товари. Съвременните мощни СТ се проектират с  $\eta_{max}$  за  $\beta = (60 \div 80)\%$  от  $R_n$ . С подбора на параметрите на СТ, респективно чрез съотношението на  $\Delta P_0$  и  $\Delta P_k$ , може да се постигне  $\eta_{max}$  да бъде и в границите на  $(30 \div 70)\%$  от  $R_n$ , т.е. максимумът на к.п.д. е в диапазона на минималното натоварване на СТ.

От фиг. 1 се вижда че при малки натоварвания ( $\beta < 0,71$ ) кривата на общите загуби  $\Delta P$  се определя в по-голяма степен от  $\Delta P_0$ . Следователно когато се работи в режим на понижено натоварване е необходимо да се използват СТ с възможно най-малки загуби на празен ход  $\Delta P_0$ . Това се постига с подбор на листовата електротехническа ламарина за магнитопровода с подходящи параметри - например с дебелина  $d < 0,35$  [mm], малки специфични загуби  $\gamma < 0,45$  [W/kg] при индукция -  $B = 10\ 000$  [гауса].

На фиг. 2 е представено относителното изменение на  $\Delta P^*[\%]$ , определено от израза:

$$\Delta P^* = (\Delta P / S) \cdot 100 = (\Delta P_0 + \beta^2 \Delta P_k) / S \cdot 100 [\%] \quad (3)$$



Фиг. 2. Относителни загуби на мощност  $\Delta P$  % с реални данни.

Изхождайки от фиг. 1 и фиг. 2, би следвало да се предположи, че  $\Delta P$  са минимални, тогава когато  $\eta \rightarrow \max$ , т.е. в сила са следните изрази:  $\eta = S2/S1 \rightarrow \max$ ;  $\Delta P = S1 - S2 \rightarrow \min$ , където  $S1$  и  $S2$  [kVA] са постъпващата и полезно използваната мощност.

Анализът на динамиката на кривите от фиг. 2 показва, че в режими на минимално натоварване ( $\beta < 0,50$ ) общите относителни загуби  $\Delta P^*$  се намаляват с нарастване на  $\beta$ , докато  $\eta$ , в съответствие с фиг. 1, непрекъснато се увеличават.

Следователно  $\Delta P$  и  $\eta$  не бива да се възприемат, като две противоречиви явления, т.е.  $\eta \rightarrow \eta_{max}$  не означава, че  $\Delta P \rightarrow \Delta P_{min}$ . Постигане на максимален к.п.д. не бива да се свързва с реализиране на минимални загуби на мощност,

което означава, че изразите (2) и (3) са несъвместими, твърдение, противно на това, което беше прието по-горе. Затова, погледнато в общ аспект, въпросът за минимум на  $\Delta P$  или търсене на оптимално натоварване на силов трансформатор, няма логическа обосновка. Такава трактовка на въпроса е логически издържана само за конкретни схемо-технически постановки, и при сравняване на различни схемни решения с различни натоварвания.

## Заклучение

Анализирани са литературни източници и са представени възможности за оптимизиране на режимите на работа на силов трансформатор. Дефиниран е т.н. икономически целесъобразен режим на работа на силов трансформатор и са разгледани различни варианти за неговото реализиране. С помощта на множество примери е показана технико-икономическата целесъобразност от прилагане на рационални подходи, при избора на броя, мощността и режимните параметри на силов трансформатор. Електроенергийната ефективност, при такава постановка, се изразява в съществено намаляване на загубите на мощност, при експлоатацията на електрическите подстанции и снижаване на разхода на ел. енергия в границите (2-7)%.

## Литература

- Алексенко, Г. В. 1966. *Паралелна работа на трансформаторов и автотрансформаторов*, М. Энергия,
- Джустров, К. 2019. Самопускане на група двигатели при кратковременно понижаване и отпадане на напрежението, *International Scientific Conference 15 – 16 November 2019, GABROVO*, pp 105-109.
- Джустров, К., Т. Николов, И. Стоилов, 2019. Цифрови релейни защиты на силови трансформатори в стоманодобива, *International Scientific Conference, 15 – 16 November 2019, GABROVO*, pp 110-115
- Ермилов, А. А. 1976. *Основы электроснабжения ПП*, М. Энергия.
- Лаков, Н., Л. Георгиев. 2013. Анализ на възможностите за оптимално компенсирание на реактивни товари в промишлени електроснабдителни мрежи, *XI научно-практическа сесия, София 25-26 април, ФНТС 2013, ISSN 1314-4537*
- Раичев, Д. 1964. *Паралелна работа на трансформаторите*, ДИ Техника, 1964.
- Федоров А. А., 1957, *Електроснабдяване на ПП*, „Наука и изкуство“, С..