

Ztráty v rozvodu elektrické energie

Hodnota ztrát v rozvodu elektrické energie je velmi důležitým ukazatelem hospodárnosti provozu. Jak již bylo uvedeno činné ztráty způsobují oteplení vodičů. Výkonové ztráty je možno se znalostí základů elektrotechniky vyjádřit pro střídavé trojfázové sítě následovně :

$$\Delta \bar{S} = 3 \cdot \Delta \bar{U}_F \cdot \bar{I}^* = 3 \cdot \bar{Z} \cdot \bar{I} \cdot \bar{I}^* = 3 \cdot \bar{Z} \cdot I^2 = 3(R + jX) \cdot I^2 \quad (3.1)$$

(Pozn. I^ je hodnota komplexně sdruženého proudu.)*

Toto komplexní číslo je možno rozdělit na reálnou část – činné ztráty a imaginární část – jalové ztráty.

$$\Delta \bar{S} = 3 \cdot RI^2 + j 3 \cdot XI^2 = \Delta P + j \Delta Q \quad (3.2)$$

Pro hodnotu činných ztrát ΔP pak platí :

$$\Delta P = 3 \cdot RI^2 = 3 \cdot R (I_e^2 + I_j^2) \quad (3.3)$$

Z uvedeného vztahu vyplývá, že činné ztráty způsobuje i jalová složka proudu, i když nekoná činnou práci. Pod pojmem elektrické ztráty se většinou rozumí ztráty činné (ΔP), u prvků s velkou indukčností (např. transformátory) se vyjadřují jak činné ztráty, tak i ztráty jalové (ΔQ).

Pro jednofázové sítě platí následující vztah :

$$\Delta P = 2 \cdot RI^2 = 2 \cdot R (I_e^2 + I_j^2) \quad (3.4)$$

Jedná se totiž o sítě dvouvodičové.

Pro stejnosměrné sítě platí pro výkonové ztráty :

$$\Delta P = 2 \cdot RI^2 \quad (3.5)$$

Jedná se rovněž o dvouvodičové sítě, stejnosměrný proud má pouze jednu složku.

1.1 Rozdělení ztrát

Ztráty v rozvodu elektrické energie lze dělit z několika hledisek :

Ztráty

- obchodní,
- technické.

Obchodní ztráty jsou vykazovány z důvodů nepřesného měření, neoprávněných odběrů, neměřených odběrů atd. Tyto ztráty jsou v podstatě využity a jejich specifikace je většinou starostí příslušné rozvodné akciové společnosti. Nejedná se o ztráty z fyzikálního hlediska. (Dále nebudou rozebírány.)

Technické ztráty jsou skutečné ztráty v rozvodu elektrické energie, které se mění na teplo.

A. Ztráty

- naprázdno (nezávisí na zatížení),
- nakrátko (závisí na zatížení).

B. Ztráty

- ve vedeních,
- v transformátorech.

1.2 Ztráty ve vedeních

U elektrických vedení se většinou v průmyslových a distribučních sítích uvažují pouze činné ztráty. Pro výpočet ztrát v trojfázové soustavě platí základní vztah :

$$\Delta P = k \cdot R I^2 \quad [W] \quad (3.6)$$

Tento vztah je používán pro výpočet ztrát vývodu rozváděče nebo napájecí trafostanice. Ve většině případů je totiž z měření k dispozici pouze hodnota proudu na začátku vývodu.

ΔP ... činné ztráty vývodu [W]
 k ... činitel zatížení
 R ... činný odpor celého vývodu [Ω]
 I ... proud vývodu [A]

Činitel zatížení k je závislý na rozložení odběrů podél vývodu. Je-li celý odběr na konci vývodu (celou délkou vývodu teče stejný proud), pak je činitel zatížení $k=3$.

V případě rovnoměrného zatížení vývodu, tj. vývod je zatížen stejnými odběry, které jsou od sebe stejně vzdálené (proud podél vedení lineárně klesá), se dá odvodit hodnota činitele zatížení $k=1$. Tento případ zatížení je např. napájení veřejného osvětlení, nebo průmyslových hal, kde je mnoho stejných strojů od sebe stejně vzdálených (obuvnické dílny).

1.3 Ztráty v transformátorech

Transformátory jsou nejvíce zastoupené stroje v rozvodu elektrické energie, proto se ztrátami v transformátorech je nutno zabývat v souvislosti se ztrátami v rozvodu elektrické energie.

U transformátorů se vyjadřují jak ztráty činné tak i ztráty jalové, rozlišují se ztráty naprázdno a nakrátko.

Činné ztráty naprázdno ΔP_0 jsou stálé ztráty, tuto hodnotu získáme z atestu transformátoru. Stejně se získá i hodnota jmenovitých ztrát nakrátko ΔP_{KN} . Ztráty nakrátko jsou závislé na zatížení transformátoru. Výsledný vztah pro činné ztráty transformátoru :

$$\Delta P_T = \Delta P_0 + \left(\frac{S}{S_N} \right)^2 \cdot \Delta P_{KN} \quad [\text{kW}] \quad (3.7)$$

ΔP_T ... činné ztráty transformátoru [kW]
 ΔP_0 ... činné ztráty transformátoru naprázdno [kW]
 ΔP_{KN} ... činné ztráty jmenovité transformátoru nakrátko [kW]
 S_N ... jmenovitý výkon transformátoru [kVA]
 S ... skutečné zatížení (výkon) transformátoru [kVA]

Jalové ztráty mají rovněž dvě složky (naprázdno a nakrátko). Ztráty naprázdno jsou závislé na proudu naprázdno transformátoru, ztráty nakrátko jsou závislé na zatížení a na napětí nakrátko. (Pozn. tyto pojmy jsou vysvětleny v kapitole 3.)

Vztah pro jalové ztráty transformátoru má tento výsledný tvar :

$$\Delta Q_T = \frac{i_0}{100} \cdot S_N + \left(\frac{S}{S_N} \right)^2 \cdot \frac{u_K}{100} \cdot S_N \quad [\text{kvar}] \quad (3.8)$$

ΔQ_T ... jalové ztráty transformátoru [kvar]
 i_0 ... proud naprázdno transformátoru [%]
 u_K ... napětí nakrátko transformátoru [%]
 S_N ... jmenovitý výkon transformátoru [kVA]
 S ... skutečné zatížení (výkon) transformátoru [kVA]

Činné ztráty transformátorů naprázdno

Ztráty způsobené hysterézními či vířivými proudy, vznikající v železe (magnetickém obvodu) díky stálé změně magnetického toku. Vliv na tyto ztráty má: kmitočet, tvar magnetizační křivky, napětí, jakost plechů a magnetická indukce. Pro kmitočet 50Hz se tyto ztráty počítají z hmoty železa a spotřeby ve $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$, označujeme jej ztrátovým číslem Δp_{10} pro indukci 1T nebo Δp_{15} pro indukci 1,5T. Tyto hodnoty jsou stejné při zatížení i při chodu transformátoru naprázdno a trvají po celou dobu, kdy je alespoň na jedné straně transformátoru připojeno napětí.

Činné ztráty transformátoru naprázdno se značí ΔP_0 a lze jej určit dle následujícího vzorce:

$$\Delta P_0 = \Delta P_V + \Delta P_{hys} \quad [\text{kW}] \quad (2.38)$$

kde

ΔP_V ztráty vířivými proudy

ΔP_{hys} ztráty hysterezi

Při průchodu proudu primárním vinutím je obvykle $R_0 \gg R_1$ proto:

$$\Delta P_0 = (R_1 + R_0) \cdot I_{10}^2 \quad [\text{kW}] \quad (2.39)$$

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} = R_0 \cdot I_{10}^2 \quad [\text{kW}] \quad (2.40)$$

$$\Delta P_0 = U_{10} \cdot I_{10} \cdot \cos \varphi_{10} \quad [\text{kW}] \quad (2.41)$$

kde

R_1 odpor primárního vinutí

R_0 náhradní odpor primárního obvodu

ΔP_{Fe} ztráty v železe (magnetickém obvodu)

U_{10}	napětí transformátoru na prázdkno
I_{10}	proud transformátoru na prázdkno
$\cos\varphi_{10}$	účinník transformátoru na prázdkno

Pro třířázový transformátor

$$\Delta P_0 = 3U_{10} \cdot I_{10} \cdot \cos \varphi_{10} \quad [\text{kW}] \quad (2.42)$$

2.1.4.2 Jalové ztráty transformátoru naprázdkno

Nepatří do celkové bilance činných ztrát, avšak významnou mírou přispívají svým vlivem ke zvýšení činných ztrát ze strany vyššího napětí. Pokud provozujeme transformátor naprázdkno, neprotéká jím čistě jalový proud I_0 , ale také proud I_{R0} kryjící ztráty v železe (magnetickém obvodu) a Jouleovy ztráty primárního vinutí.

Proud naprázdkno tedy je:

$$I_0 = I_{R0} + jI_{L0} \quad [\text{A}] \quad (2.43)$$

kde

I_0	jalový proud
I_{L0}	magnetizační složka proudu naprázdkno (kdy $I_{L0} \approx I_\mu$)
I_{R0}	proud kryjící ztráty v železe a Jouleovy ztráty (kdy $I_{R0} \ll I_{L0}$)

Složka I_{R0} se ve vektorovém součtu neuplatní, protože $I_{R0} \ll I_{L0}$. Proud naprázdkno i_0 se udává v procentech jmenovitého proudu. Poté lze vypočítat jalový ztrátový výkon jako:

$$\Delta Q_0 = i_0 \cdot S_n \cdot 10^{-2} \quad [\text{kVar}] \quad (2.44)$$

kde

i_0	jmenovitý proud transformátoru naprázdkno [%]
S_n	zdánlivý výkon transformátoru [kVar]

Činné ztráty transformátorů nakrátko

Jsou to ztráty, které vznikají ve vinutí transformátoru průchodem proudu. Na tyto ztráty má tedy vliv průřez vinutí, materiál, zapojení vinutí a velikost proudu procházející vinutím.

Činné ztráty lze vypočítat dle vzorce:

$$\Delta P_k = \Delta P_{kn} \cdot \left(\frac{S_s}{S_n} \right)^2 \quad [\text{kW}]$$

(2.68)

kde

ΔP_{kn}	jmenovité ztráty nakrátko [W]
S_s	zdánlivý špičkový výkon transformátoru [kVA]
S_n	jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru [kVA]

Činné ztráty elektrické energie za určité sledované období T:

$$W_k = \Delta P_k \cdot \left(\frac{S_s}{S_n} \right)^2 \cdot T = \Delta P_k \cdot \beta^2 \cdot T_\Delta$$

(2.69)

kde

T_Δ	doba plných ztrát [hod]; (pozn.: odvozená z dodané energie, špičkového zatížení a doby provozu)
β	zatěžovatel

2.2.2.2 Jalové ztráty transformátorů nakrátko

Nezařazují se do celkové bilance činných ztrát, avšak činné ztráty jsou jimi ovlivněny v návazném distribučním zařízení ze strany vyššího napětí, proto je s těmito ztrátami nutné počítat. Jalový výkon transformátoru nakrátko způsobuje ztráty vyvolané rozptylovou reaktancí vinutí.

Výpočet hodnot jmenovitého napětí nakrátko:

$$u_k = u_{Pk} + j u_{Qk} \quad [\%]$$

(2.70)

kde

u_{Pk}	činná složka jmenovitého napětí
ju_{Qk}	jalová složka jmenovitého napětí

Činná složka u_{Pk} je proti jalové složce ju_{Qk} malá, ve vektorovém součtu se nedá uplatnit, proto se uvažuje, že $u_k \approx u_{Qk}$. Poté platí pro jmenovitý jalový ztrátový výkon nakrátko vztah:

$$\Delta Q_{kn} = \frac{u_k}{100} \cdot S_n \quad [\text{kVar}]$$

(2.71)

kde

u_k	jmenovité napětí nakrátko [%]
S_n	jmenovitý zdánlivý výkon [kVA]

Vztah pro celkový ztrátový výkon transformátoru nakrátko:

$$\Delta Q_k = \Delta Q_{kn} \cdot \left(\frac{S_s}{S_n} \right)^2 \quad [\text{kVar}]$$

(2.72)

kde

ΔQ_{kn}	jmenovité ztráty nakrátko [kVar]
S_s	zdánlivý špičkový výkon transformátoru [kVA]
S_n	jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru [kVA]

1.4 Možnosti snižování ztrát

Možnosti snižování ztrát vychází ze základního vzorce pro výpočet ztrát. Je možno snížit buď odpor vedení nebo proudové zatížení. Protože proud se v tomto vztahu vyskytuje ve čtverci dojde ke snížení ztrát i zrovnoměrněním zatížení.

Možnosti snižování ztrát se dělí do dvou skupin :

A. Bez nároků na investice

- zmenšení špičkového zatížení
- účelné rozdělení zatížení mezi jednotlivé napájecí body,
- hospodárné zatěžování skupin transformátorů,

- zmenšení nesouměrnosti zatížení,
- hospodárné zatížení vodičů,
- pečlivá údržba zařízení,
- regulace napětí.

B. S investičními nároky

- kompenzace účinníku,
- přechod na vyšší hladinu napětí,
- zvětšení průřezu vodičů,
- výměna zařízení se špatnou účinností,
- vhodné propojení sítě.

1.5 Zjišťování ztrát

Metody zjišťování ztrát jsou v podstatě dvě :

- výpočtem,
- měřením.

Vztahy pro výpočet ztrát byly uvedeny v předchozích odstavcích. Měření ztrát je velmi složité. Zjednodušeně se dá říci, že ztráty se dají měřit odečtem elektroměrů u výroby a spotřeby. (V případě průmyslového odběru měřením elektrické energie na vstupu a u jednotlivých spotřebičů.)

Při měření elektrických ztrát je celá řada problémů – nesoučasnost odečtů atd. Metodika pro měření ztrát se musí vypracovat vždy pro konkrétní odběr, nebo část sítě.