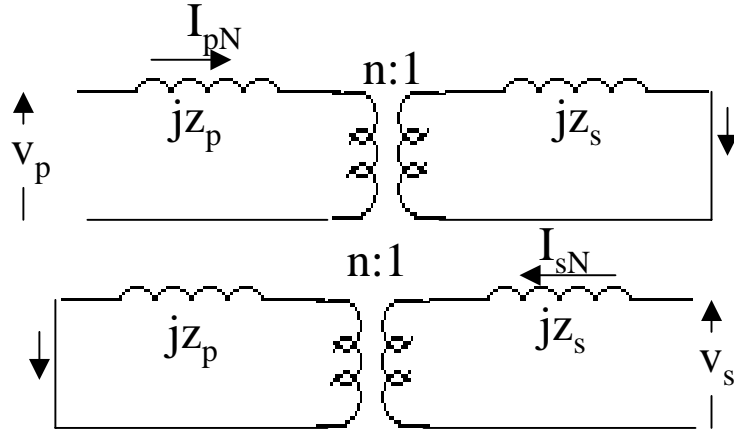


変圧器の%Z, タップに差がある場合の並列運転

並列2台の変圧器のタップ比が異なる場合、インピーダンスに逆比例する負荷分流に加え、タップ電圧差をインピーダンスの和で割った値に相当する循環電流が流れる。これは大部分が無効電力であり、無効電力損失と同時に銅損も発生させるので、可能な限り両変圧器のタップ比を近づかせておくことが好ましい。

変圧器のインピーダンスの測定

相手端を短絡して定格電流を流しその時の電圧を測定し、定格電圧に対する比率を求める。
 タップ比 n は各基準電圧ベースの変圧比。
 基準電圧/基準電圧 のとき $n = 1$



p : 一次、 s : 二次、 N : 定格、 P : 機器容量

$$Z_p = v_p / I_{pN}$$

$$\%Z_p = \frac{v_p}{V_{pN}} \times 100 = \frac{v_p \times V_{pN}}{V_{pN} \times V_{pN}} \times 100$$

$$= \frac{Z_p \times I_{pN} \times V_{pN}}{V_{pN}^2} \times 100 = Z_p \times \frac{P[\text{MVA}]}{V_{pN}[\text{kV}]^2} \times 100$$

$$Z_s = v_s / I_{sN}$$

$$\%Z_s = \frac{v_s}{V_{sN}} \times 100 = \frac{v_s \times V_{sN}}{V_{sN} \times V_{sN}} \times 100$$

$$= \frac{Z_s \times I_{sN} \times V_{sN}}{V_{sN}^2} \times 100 = Z_s \times \frac{P[\text{MVA}]}{V_{sN}[\text{kV}]^2} \times 100$$

$$Z_p = jx_p + jx_s \times n^2, Z_s = jx_s + jx_p / n^2$$

$$\therefore Z_p = Z_s \times n^2$$

$$\%Z_p = Z_p \times \frac{P}{V_{pN}^2} \times 100 = Z_s \times n^2 \times \frac{P}{V_{pN}^2} \times 100$$

$$= Z_s \times \frac{P}{V_{sN}^2} \times 100 = \%Z_s$$

すなわち、 $\%Z$ は一次側から見ても、
 二次側から見ても同じ 値になる。
 また、 $\%Z$ は、三相回路でも、

$$\%Z = v_p / (V_{pN} / \sqrt{3}) \times 100 = \frac{Z_p \times I_{pN}}{V_{pN} / \sqrt{3}} \times 100$$

$$= \frac{Z_p \times \sqrt{3} V_{pN} I_{pN}}{V_{pN}^2} \times 100 = \frac{Z_p \times P}{V_{pN}^2} \times 100、\text{と同形となる。}$$

基準容量 P_0 [MVA] ベースで表せば、

$$\%Z(P_0) = \%Z(P) \times \frac{P_0}{P} \text{ であるが}$$

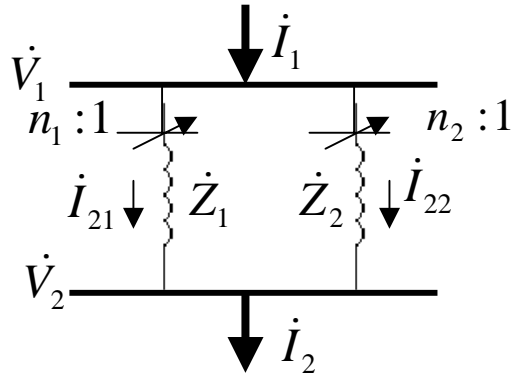
$$= Z_p \times \frac{P_0}{V_{pN}^2} \times 100 = Z_s \times \frac{P_0[\text{MVA}]}{V_{sN}^2[\text{kV}]^2} \times 100、$$

すなわち、 Ω 値に比例となる。

以下、数値は%値または%値を100で割った値（単位法表示 p.u = per unit.）を用いる。

タップ差がある変圧器2台の並列運転

以下、数値はすべて単位法での値とする。



$$i_{21} = \frac{1}{Z_1} \left(\frac{1}{n_1} \dot{V}_1 - \dot{V}_2 \right) \dots \textcircled{1}$$

$$i_{22} = \frac{1}{Z_2} \left(\frac{1}{n_2} \dot{V}_1 - \dot{V}_2 \right) \dots \textcircled{2}$$

$$i_1 = \frac{1}{n_1} i_{21} + \frac{1}{n_2} i_{22} \dots \textcircled{3}$$

$$i_2 = i_{21} + i_{22} \dots \textcircled{4}$$

①②から、

$$\dot{V}_2 = \frac{\dot{V}_1}{n_1} - \dot{Z}_1 i_{21} = \frac{\dot{V}_1}{n_2} - \dot{Z}_2 i_{22}$$

$$\textcircled{4} \text{を代入} \quad \frac{\dot{V}_1}{n_1} - \dot{Z}_1 i_{21} = \frac{\dot{V}_1}{n_2} - \dot{Z}_2 (i_2 - i_{21})$$

$$i_{21} (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2) = \frac{\dot{V}_1}{n_1} - \frac{\dot{V}_1}{n_2} + \dot{Z}_2 i_2$$

$$\therefore i_{21} = \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} i_2 + \frac{\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dot{V}_1 \dots \textcircled{5}$$

$$i_{22} = i_2 - i_{21} = \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} i_2 - \frac{\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \dot{V}_1 \dots \textcircled{6}$$

⑤⑥式の右辺第1項は、二次負荷電流がインピーダンスに逆比例して(アドミタンスに比例して)分流することを示し、第2項は大きさが等しく向きが逆であり、タップ差による循環電流を表している。その値は二次側換算の一次電圧の差を、両変圧器のインピーダンスの和で除した値になっている。

$n_1 = n_2$ のときは、この項は現れない。

循環電流は無効電力損失 (および有効電力損失) を発生させ、電流容量も消費するため好ましくない存在であるから、極力タップ差が少なくなるように選定する必要がある。

第 l 変圧器の二次電流 i_{2l} は、

$$i_{2l} = \frac{1}{\dot{Z}_l} \left(\frac{1}{n_l} \dot{V}_1 - \dot{V}_2 \right) \dots \textcircled{7}$$

$$i_2 = \sum_{k=1}^m i_{2k} = \sum_{k=1}^m \frac{1}{\dot{Z}_k} \left(\frac{1}{n_k} \dot{V}_1 - \dot{V}_2 \right) = \sum_{k=1}^m \frac{\dot{V}_1}{n_k \dot{Z}_k} - \sum_{k=1}^m \frac{\dot{V}_2}{\dot{Z}_k}$$

$$\sum_{k=1}^m \frac{\dot{V}_2}{\dot{Z}_k} = i_2 - \sum_{k=1}^m \frac{\dot{V}_1}{n_k \dot{Z}_k} \leftrightarrow \dot{V}_2 = \dot{V}_1 \sum_{k=1}^m \frac{1}{n_k \dot{Z}_k} / \sum_{k=1}^m \frac{1}{\dot{Z}_k} - i_2 / \sum_{k=1}^m \frac{1}{\dot{Z}_k} \dots \textcircled{8}$$

⑦に代入して、

$$i_{2l} = \frac{\dot{V}_1}{n_l \dot{Z}_l} - \frac{1}{\dot{Z}_l} \left(\dot{V}_1 \sum_{k=1}^m \frac{1}{n_k \dot{Z}_k} / \sum_{k=1}^m \frac{1}{\dot{Z}_k} - i_2 / \sum_{k=1}^m \frac{1}{\dot{Z}_k} \right) = i_2 \left(\frac{1}{\dot{Z}_l} / \sum_{k=1}^m \frac{1}{\dot{Z}_k} \right) + \frac{\dot{V}_1}{\dot{Z}_l} \left(\frac{1}{n_l} - \sum_{k=1}^m \frac{1}{n_k \dot{Z}_k} / \sum_{k=1}^m \frac{1}{\dot{Z}_k} \right)$$

第1項が負荷電流の分流分、第2項がタップ差による循環電流を表す。

$n_l = \text{一定値}$ のときはこの項は0になる。

2台の場合のチェック ($m=2$)

$$\begin{aligned}
 \dot{i}_{21} &= \dot{i}_2 \left(\frac{1}{\dot{Z}_l} / \sum_{k=1}^m \frac{1}{\dot{Z}_k} \right) + \frac{\dot{V}_1}{\dot{Z}_l} \left(\frac{1}{n_l} - \sum_{k=1}^m \frac{1}{n_k \dot{Z}_k} / \sum_{k=1}^m \frac{1}{\dot{Z}_k} \right) \\
 &= \dot{i}_2 \left\{ \frac{1}{\dot{Z}_1} / \left(\frac{1}{\dot{Z}_1} + \frac{1}{\dot{Z}_2} \right) \right\} + \frac{\dot{V}_1}{\dot{Z}_1} \left\{ \frac{1}{n_1} - \left(\frac{1}{n_1 \dot{Z}_1} + \frac{1}{n_2 \dot{Z}_2} \right) / \left(\frac{1}{\dot{Z}_1} + \frac{1}{\dot{Z}_2} \right) \right\} \\
 &= \frac{\dot{i}_2 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} + \frac{\dot{V}_1 \left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2} \right)}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \\
 \dot{i}_{22} &= \frac{\dot{i}_2 \dot{Z}_1}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} - \frac{\dot{V}_1 \left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2} \right)}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}
 \end{aligned}$$

3台の場合のチェック ($m=3$)

$$\begin{aligned} \dot{i}_{21} &= \dot{i}_2 \left(\frac{1}{\dot{Z}_l} / \sum_{k=1}^m \frac{1}{\dot{Z}_k} \right) + \frac{\dot{V}_1}{\dot{Z}_l} \left(\frac{1}{n_l} - \sum_{k=1}^m \frac{1}{n_k \dot{Z}_k} / \sum_{k=1}^m \frac{1}{\dot{Z}_k} \right) \\ &= \dot{i}_2 \left\{ \frac{1}{\dot{Z}_1} / \left(\frac{1}{\dot{Z}_1} + \frac{1}{\dot{Z}_2} + \frac{1}{\dot{Z}_3} \right) \right\} + \frac{\dot{V}_1}{\dot{Z}_1} \left\{ \frac{1}{n_1} - \left(\frac{1}{n_1 \dot{Z}_1} + \frac{1}{n_2 \dot{Z}_2} + \frac{1}{n_3 \dot{Z}_3} \right) / \left(\frac{1}{\dot{Z}_1} + \frac{1}{\dot{Z}_2} + \frac{1}{\dot{Z}_3} \right) \right\} \end{aligned}$$

$$\dot{i}_{21} = \dot{i}_2 \left\{ \frac{1}{\dot{Z}_1} / \left(\frac{1}{\dot{Z}_1} + \frac{1}{\dot{Z}_2} + \frac{1}{\dot{Z}_3} \right) \right\} + \dot{V}_1 \left\{ \frac{\dot{Z}_3 \left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2} \right) + \dot{Z}_2 \left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_3} \right)}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + \dot{Z}_2 \dot{Z}_3 + \dot{Z}_3 \dot{Z}_1} \right\}$$

$$\dot{i}_{22} = \dot{i}_2 \left\{ \frac{1}{\dot{Z}_2} / \left(\frac{1}{\dot{Z}_1} + \frac{1}{\dot{Z}_2} + \frac{1}{\dot{Z}_3} \right) \right\} + \dot{V}_1 \left\{ \frac{\dot{Z}_1 \left(\frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_3} \right) + \dot{Z}_3 \left(\frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_1} \right)}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + \dot{Z}_2 \dot{Z}_3 + \dot{Z}_3 \dot{Z}_1} \right\}$$

$$\dot{i}_{23} = \dot{i}_2 \left\{ \frac{1}{\dot{Z}_3} / \left(\frac{1}{\dot{Z}_1} + \frac{1}{\dot{Z}_2} + \frac{1}{\dot{Z}_3} \right) \right\} + \dot{V}_1 \left\{ \frac{\dot{Z}_2 \left(\frac{1}{n_3} - \frac{1}{n_1} \right) + \dot{Z}_1 \left(\frac{1}{n_3} - \frac{1}{n_2} \right)}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + \dot{Z}_2 \dot{Z}_3 + \dot{Z}_3 \dot{Z}_1} \right\}$$

第1項はアドミタンスに比例する負荷分担を、第2項は総和が0で循環電流を表す。タップ比がすべて等しいときには現れない。