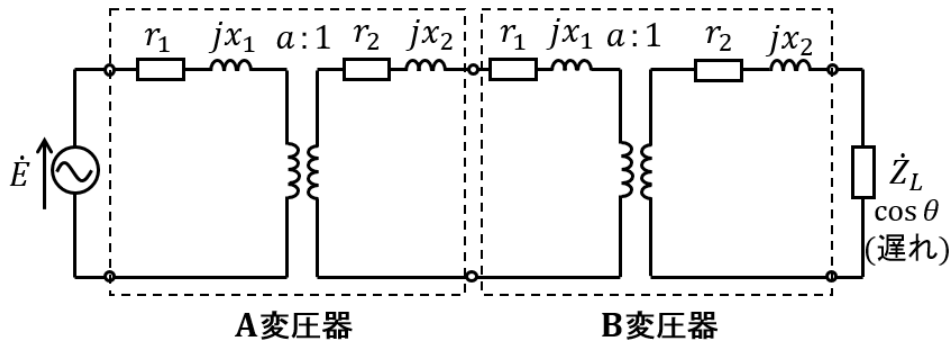


電験3種 奮闘講座 %インピーダンス

監修：電験予備校 東京電気学院（不許複製）

【問題】

定格容量 $S_n = 1000[\text{VA}]$ 、定格一次電圧 $V_{1n} = 1000[\text{V}]$ 、巻数比 $a = 10$ 、一次側巻線抵抗 $r_1 = 0.08[\Omega]$ 、漏れリアクタンス $x_1 = 0.1[\Omega]$ 、二次側巻線抵抗 $r_2 = 0.003[\Omega]$ 、漏れリアクタンス $x_2 = 0.004[\Omega]$ の単相変圧器A、Bがある。図のように、この変圧器2台を直列に接続し末端端子に力率 $\cos \theta = 0.8$ (遅れ)の定格負荷を接続した。交流電源 $E = 1000[\text{V}]$ を印加したときの電圧変動率を求めよ。ただし、電源電圧と末端端子電圧の相差角は小さいものとする。



【解答】

<オーム法による解法>

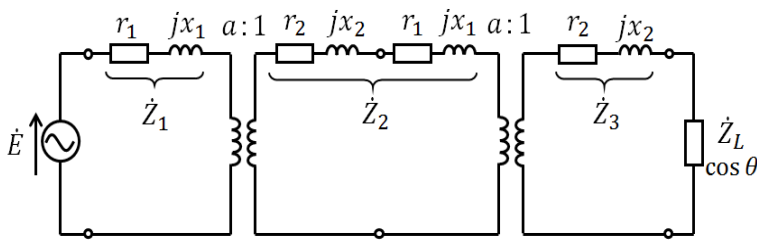


図1

図1のように、A変圧器一次側、A変圧器二次側～B変圧器一次側、B変圧器二次側のインピーダンスをそれぞれ $\dot{Z}_1[\Omega]$ 、 $\dot{Z}_2[\Omega]$ 、 $\dot{Z}_3[\Omega]$ として、巻数比 a を用いてすべてA変圧器一次側に換算する。ただし、換算後のインピーダンスには、ダッシュ(')をつける。

$$\begin{aligned} \dot{Z}_1 &= r_1 + jx_1 = 0.08 + j0.1[\Omega] \\ \dot{Z}'_2 &= a^2 \dot{Z}_2 = a^2 \{ (r_2 + jx_2) + (r_1 + jx_1) \} \\ &= 10^2 \times \{ (0.003 + j0.004) + (0.08 + j0.1) \} \\ &= 8.3 + j10.4[\Omega] \\ \dot{Z}'_3 &= a^4 \dot{Z}_3 = a^4 (r_2 + jx_2) \\ &= 10^4 \times (0.003 + j0.004) \\ &= 30 + j40[\Omega] \end{aligned}$$

故に、一次換算後の合成インピーダンス $\dot{Z}_0[\Omega]$ は、

$$\begin{aligned} \dot{Z}_0 &= \dot{Z}_1 + \dot{Z}'_2 + \dot{Z}'_3 \\ &= (0.08 + j0.1) + (8.3 + j10.4) + (30 + j40) \\ &= 38.38 + j50.5[\Omega] \\ &= R_0 + jX_0[\Omega] \text{ とおく。} \end{aligned}$$

次に、定格電流 $I_{1n}[\text{A}]$ は定格容量 $S_n[\text{VA}]$ から

$$I_{1n} = \frac{S_n}{V_{1n}} = \frac{1000}{1000} = 1[\text{A}]$$

合成巻線抵抗 R_0 、リアクタンス X_0 より%抵抗降下 $p[\%]$ および%リアクタンス降下 $q[\%]$ は、

$$\begin{aligned} p &= \frac{R_0 I_{1n}}{V_{1n}} \times 100 = \frac{38.38 \times 1}{1000} \times 100 \\ &= 3.838[\%] \\ q &= \frac{X_0 I_{1n}}{V_{1n}} \times 100 = \frac{50.5 \times 1}{1000} \times 100 \\ &= 5.05[\%] \end{aligned}$$

したがって、電圧変動率 $\varepsilon[\%]$ は

$$\begin{aligned}\varepsilon &\doteq p \cos \theta + q \sin \theta [\%] \\ &= 3.838 \times 0.8 + 5.05 \times \sqrt{1 - 0.8^2} \\ &\doteq 6.10[\%] \quad (\text{答})\end{aligned}$$

<%インピーダンス法による解法>

基準容量 S_B [VA]、基準電圧 E_B [V]をそれぞれ表1に示す。

表1: 各基準容量と基準電圧

	A変圧器 一次側	A二次側~ B一次側	B変圧器 二次側
基準容量 [VA]	$S_B = 1000$	$S_B = 1000$	$S_B = 1000$
基準電圧 [V]	$E_{B1} = 1000$	$E_{B2} = 100$	$E_{B3} = 10$

※基準電圧はそれぞれ巻数比 a から算出

A変圧器一次側、A変圧器二次側~B変圧器一次側、B変圧器二次側の%抵抗降下をそれぞれ R_1 [%]、 R_2 [%]、 R_3 [%]、%リアクタンス降下をそれぞれ X_1 [%]、 X_2 [%]、 X_3 [%]とすると、次式で示せる。

$$\begin{aligned}R_1 &= \frac{r_1 S_B}{E_{B1}^2} \times 100 = \frac{0.08 \times 1000}{1000^2} \times 100 \\ &= 0.008[\%]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}R_2 &= \frac{(r_2 + r_1) S_B}{E_{B2}^2} \times 100 \\ &= \frac{(0.003 + 0.08) \times 1000}{100^2} \times 100 = 0.83[\%]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}R_3 &= \frac{r_2 S_B}{E_{B3}^2} \times 100 = \frac{0.003 \times 1000}{10^2} \times 100 \\ &= 3[\%]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}X_1 &= \frac{x_1 S_B}{E_{B1}^2} \times 100 = \frac{0.1 \times 1000}{1000^2} \times 100 \\ &= 0.01[\%]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}X_2 &= \frac{(x_2 + x_1) S_B}{E_{B2}^2} \times 100 \\ &= \frac{(0.004 + 0.1) \times 1000}{100^2} \times 100 = 1.04[\%]\end{aligned}$$

$$X_3 = \frac{x_2 S_B}{E_{B3}^2} \times 100 = \frac{0.004 \times 1000}{10^2} \times 100$$

$$= 4[\%]$$

故に、合成の%抵抗降下 R_0 [%]および%リアクタンス降下 X_0 [%]は、

$$\begin{aligned}R_0 &= R_1 + R_2 + R_3 \\ &= 0.008 + 0.83 + 3 = 3.838[\%]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}X_0 &= X_1 + X_2 + X_3 \\ &= 0.01 + 1.04 + 4 = 5.05[\%]\end{aligned}$$

したがって、電圧変動率 ε [%]は

$$\begin{aligned}\varepsilon &\doteq R_0 \cos \theta + X_0 \sin \theta [\%] \\ &= 3.838 \times 0.8 + 5.05 \times \sqrt{1 - 0.8^2} \\ &\doteq 6.10[\%] \quad (\text{答})\end{aligned}$$

◆変圧器の復習

1. 電圧変動率

定格の電流・周波数・力率において、二次巻線の端子電圧が定格二次電圧 V_{2n} になるよう、一次端子電圧を調整する。その状態のまま無負荷にしたときの二次端子電圧を V_{20} とすると、電圧変動率 ε は次式で定義される。

$$\varepsilon = \frac{V_{20} - V_{2n}}{V_{2n}} \times 100[\%] \cdots \textcircled{1}$$

2. 等価回路の作図と電圧則の立式

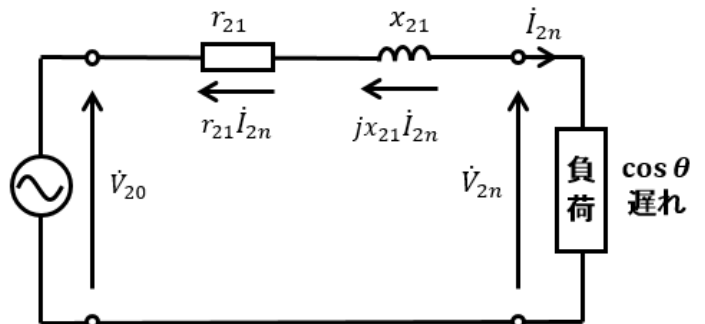


図2: 二次側換算の等価回路(励磁回路は省略)

V_{20} [V]: 一次側端子電圧(二次側無負荷端子電圧)
 I_{2n} [A]: 定格二次電流 V_{2n} [V]: 定格二次電圧
 r_{21} [Ω]: 合成巻線抵抗
 x_{21} [Ω]: 合成漏れリアクタンス
 z_{21} [Ω]: 合成インピーダンス
 ※全て二次側換算した値

図2の等価回路より、キルヒホッフの電圧則を立式する。

$$\dot{V}_{20} = \dot{V}_{2n} + r_{21}I_{2n} + jx_{21}I_{2n}[\text{V}] \cdots \textcircled{2}$$

3. ベクトル図の作成

②式より、ベクトル図を作図する。
(基準ベクトルを \dot{V}_{2n} 、力率 $\cos\theta$ は遅れとする)

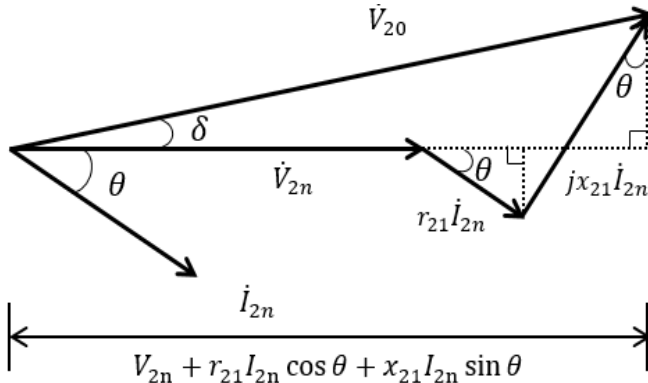


図3:ベクトル図

図3にて相差角 δ が十分小さいものと考えられるとき、次式が成り立つ

$$V_{20} \doteq V_{2n} + r_{21}I_{2n} \cos\theta + x_{21}I_{2n} \sin\theta \cdots \textcircled{3}$$

4. 電圧変動率 ε [%]の導出

③式を電圧変動率の定義式(①式)に代入する。

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{V_{20} - V_{2n}}{V_{2n}} \times 100 \\ &\doteq \frac{V_{2n} + r_{21}I_{2n} \cos\theta + x_{21}I_{2n} \sin\theta - V_{2n}}{V_{2n}} \times 100 \\ &= \frac{r_{21}I_{2n} \cos\theta}{V_{2n}} \times 100 + \frac{x_{21}I_{2n} \sin\theta}{V_{2n}} \times 100 \\ &= p \cos\theta + q \sin\theta [\%] \cdots \textcircled{4} \end{aligned}$$

ただし、

$$p = \frac{r_{21}I_{2n}}{V_{2n}} \times 100 [\%] \text{を}\% \text{抵抗降下}$$

$$q = \frac{x_{21}I_{2n}}{V_{2n}} \times 100 [\%] \text{を}\% \text{リアクタンス降下}$$

という。

以上が電圧変動率を求める簡易式の導出であり、本問では④式(簡易式)を用いて電圧変動率を求める。

◆オーム法と%インピーダンス法について

1. オーム法と%インピーダンス法

電気回路の計算において「オーム法」ではインピーダンス $[\Omega]$ を用いるが、「%インピーダンス法」では%インピーダンス[%]を用いる。故障計算など送配電システムの計算では%インピーダンス法を用いることが多い。これは、変圧器の一次、二次のインピーダンス換算が不用になるなど計算を大幅に簡略化できるメリットが大きい。

2. %インピーダンスの定義

%インピーダンス $\%Z$ [%]はインピーダンス Z に定格電流(基準電流) I_n が流れたときに生じる電圧降下と、定格電圧(基準電圧) E_n の比を%で表したものである。

(図4)

また、ここで大切なのは基準となる容量と電圧を決めることである。

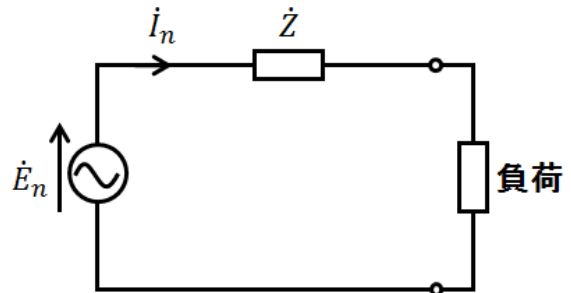


図4

$$\%Z = \frac{ZI_n}{E_n} \times 100 = \frac{ZS_n}{E_n^2} \times 100 [\%] \cdots \textcircled{5}$$

⑤式で $S_n = E_n I_n$ [VA]は定格容量である。この式より%Zは電氣的な容量に比例することがわかる。%Zの計算を行うときは、任意の容量に統一しなければならない。

S [VA]基準の%Zを S' [VA]基準に換算したものを%Z' とすると、%Z' は次式で求められ

る。

$$\%Z' = \frac{S'}{S} \%Z [\%]$$

%インピーダンス[%]の回路での直並列接続における合成%インピーダンスの計算は、インピーダンス[Ω]の場合と同様に扱える。

3. 短絡故障

(1) 短絡電流

短絡故障とは、送電線などが抵抗0[Ω]で短絡することで、短絡故障が発生すると電流を制限するものは、線路や電源変圧器のインピーダンス(短絡インピーダンス)のみとなり、これらは非常に小さい値であるため、短絡電流は非常に大きな値となる。

図4の回路より、負荷側を短絡したとき短絡電流 $I_s = E_n / Z$ [A]であるが、%Zを用いると I_s は次式で示すことができる。

$$I_s = \frac{E_n}{Z} = E_n \frac{100I_n}{\%ZE_n} = \frac{100}{\%Z} I_n [\text{A}] \cdots \textcircled{6}$$

$$(\because Z = \frac{\%ZE_n}{100I_n} [\Omega])$$

本問題は電圧変動率を問う問題であるが、末端端子を短絡した場合に本問題のA変圧器一次側に流れる短絡電流 I_{1s} はどのようなか検討する。

%抵抗降下 $R_0 = 3.838[\%]$ および%リアクタンス降下 $X_0 = 5.05[\%]$ より%インピーダンス%Z[%]は

$$\begin{aligned} \%Z &= \sqrt{R_0^2 + X_0^2} = \sqrt{3.838^2 + 5.05^2} \\ &\cong 6.343[\%] \end{aligned}$$

したがって、A変圧器一次側に流れる定格電流 $I_{1n} = 1[\text{A}]$ より短絡電流 $I_{1s}[\text{A}]$ は、

$$I_{1s} = \frac{100}{\%Z} I_{1n} = \frac{100}{6.343} \times 1 \cong 15.77[\text{A}]$$

となる。つまり、本問題の回路においては定格電流に対して15.77倍の短絡電流が流

れることがわかる。

⑥式より、短絡電流を容量[VA]で表現したものが短絡容量である。

三相回路では、線間電圧を $V_n[\text{V}]$ とすると、定格容量 $S_n = \sqrt{3}V_nI_n[\text{VA}]$ を基に短絡容量 S_s がどのくらいになるか、次式で示せる。

$$S_s = \sqrt{3}V_nI_s = \sqrt{3}V_n \frac{100}{\%Z} I_n = \frac{100}{\%Z} S_n [\text{VA}]$$

送配電線路や需要家における遮断器の選定をするときに、この短絡容量は重要である。その線路における短絡容量の値よりも大きい**遮断容量**をもつ遮断器を選定しなければならない。

(2) 短絡電流の軽減対策

短絡電流の軽減対策は、⑥式より系統のインピーダンスを増加すれば良いが、この場合、電圧変動の増加、安定度の低下、変圧器効率の低下などを総合的に検討する必要がある。

代表的な対策を以下に示す。

- ・ 発電所母線の常時分離
- ・ 発電所母線の事故時分離
- ・ 限流リアクトルの採用
- ・ 高インピーダンス機器の採用
- ・ 上位電圧系統導入による下位系統の分割
- ・ 直流連系の採用

<ポイント>

- 本問題は変圧器の電圧変動率を求める機械科目問題であるが、基本的な考え方は電力科目における短距離送配電線の電圧降下を求める際も同じである。このように、各科目は共通する内容が少なくないことから、独立した別物という認識ではなく、相互に関連付けて学習することが望ましい。
- オーム法は変圧器の巻数比換算が伴うが、%インピーダンス法はその換算が

不要になるメリットがある。

その際、重要になるのが基準容量および基準電圧を定めることである。

- 電力系統における事故には短絡故障の他に地絡故障がある。地絡故障とは、送配電線路に樹木やクレーンのアーム、飛来物等が接触したり、雷撃などにより碍子がフラッシュオーバーすることにより大地に電気が流れる現象である。地絡電流の大きさは中性点接地方式によって異なる。

※本問題は、「オーム法」と「%インピーダンス法」を対比して考えるためにあえてこのような設問とした。