

【問題】

定格容量 $30[\text{kV}\cdot\text{A}]$ 、定格電圧 $6600/210[\text{V}]$ の単相変圧器があり、一次側を短絡して二次側に定格電流を流したとき、二次電圧 $5.25[\text{V}]$ 、二次入力 $450[\text{W}]$ であった。この変圧器を遅れ力率 $80[\%]$ で使用した場合の電圧変動率はいくつか。

【解答】

この問題では変圧器の短絡試験を扱っている。そして、電圧変動率は短絡試験で計測した値を用いて求めることができる。



変圧器の定格容量を $P_n[\text{kV}\cdot\text{A}]$ とし、短絡試験で計測した入力電力(インピーダンスワット) $W_s[\text{W}]$ と電圧(インピーダンス電圧) $V_s[\text{V}]$ 、二次側定格電圧 $V_{2n}[\text{V}]$ から%インピーダンス降下 $\%Z[\%]$ と%抵抗降下 $p[\%]$ と%リアクタンス降下 $q[\%]$ を求める。

$$\%Z = \frac{V_s}{V_{2n}} \times 100 = \frac{5.25}{210} \times 100 = 2.50[\%]$$

$$p = \frac{W_s}{P_n} \times 100 = \frac{450}{30 \times 10^3} \times 100 = 1.50[\%]$$

$$q = \sqrt{(\%Z)^2 - p^2} = \sqrt{2.5^2 - 1.5^2} = 2.00[\%]$$

遅れ力率 $\cos \theta = 0.8$ と上記の値を用いて、電圧変動率 $\varepsilon[\%]$ を求める。

$$\begin{aligned} \varepsilon &\doteq p \cos \theta + q \sin \theta \\ &= 1.5 \times 0.8 + 2 \times \sqrt{1 - 0.8^2} \\ &= 2.40[\%] \quad (\text{答}) \end{aligned}$$

<短絡試験と%Z>

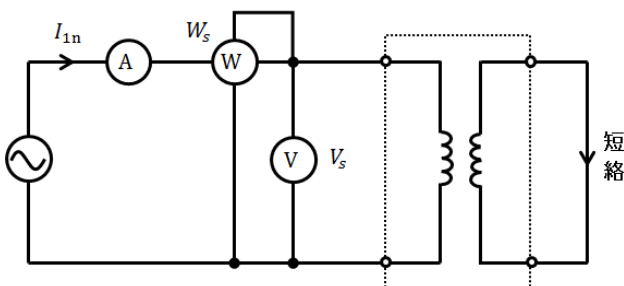


図1: 短絡試験

図1のように、変圧器の二次側を短絡して一次側に定格一次電流 $I_{1n}[\text{A}]$ が流れるように加えた電圧 $V_s[\text{V}]$ をインピーダンス電圧(定格値よりも低い)、このときの一次入力 $W_s[\text{W}]$ をインピーダンスワットという。そして、この試験を短絡試験という。

インピーダンス電圧 $V_s[\text{V}]$ は、定格電圧との比をとり、%インピーダンス降下 $\%Z[\%]$ で示す。

$$\%Z = \frac{V_s}{V_{1n}} \times 100 = \frac{ZI_{1n}}{V_{1n}} \times 100[\%]$$

$Z[\Omega]$ は変圧器内部のインピーダンス、 $V_{1n}[\text{V}]$ は定格一次電圧である。ここで、本問は二次側ではなく一次側を短絡しているが、変圧器の内部インピーダンス自体が変化するわけではないことから、短絡試験はどちらからでも試験ができる。

インピーダンスワット $W_s[\text{W}]$ は、変圧器の全負荷銅損を示している。また、短絡試験では印加電圧がインピーダンス電圧で定格値に比べ極めて小さいため( $\%Z$ 倍)、鉄損は無視して考えることができる。

変圧器の巻線抵抗 $R[\Omega]$ 、漏れリアクタンス $X[\Omega]$ を用いると、それぞれ $\%Z$ と同様に%抵抗降下 $p$ と%リアクタンス降下 $q$ を次式で定義される。

$$\begin{aligned} p &= \frac{RI_{1n}}{V_{1n}} \times 100 = \frac{RI_{1n}^2}{V_{1n}I_{1n}} \times 100 \\ &= \frac{W_s}{P_n} \times 100[\%] \end{aligned}$$

$$q = \frac{XI_{2n}}{V_{2n}} \times 100 = \sqrt{(\%Z)^2 - p^2} [\%]$$

%抵抗降下 $p$ は抵抗による電圧降下の割合（定格容量 $P_n$ に対する全負荷銅損 $W_s$ の割合を示している）を、%リアクタンス降下 $q$ はリアクタンスによる電圧降下の割合を示している。

### <電圧変動率 $\varepsilon$ [%]簡易式の導出>

電圧変動率 $\varepsilon$ [%]の%抵抗降下 $p$ [%]と%リアクタンス降下 $q$ [%]との関係を示す。

#### 1. 電圧変動率の定義式

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 $\varepsilon$ は次式で定義される。

$$\varepsilon = \frac{V_{20} - V_{2n}}{V_{2n}} \times 100 [\%] \cdots \textcircled{3}$$

#### 2. 等価回路の作図と電圧則の立式

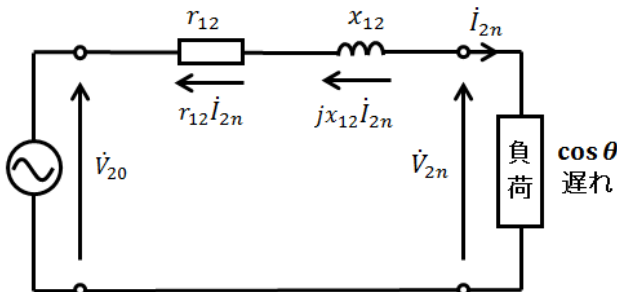


図2: 二次側換算の等価回路(励磁回路は省略)

$V_{20}$  [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

$r_{12}$  [Ω]: 合成巻線抵抗

$x_{12}$  [Ω]: 合成漏れリアクタンス

$z_{12}$  [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。

$$\dot{V}_{20} = \dot{V}_{2n} + r_{12} \dot{I}_{2n} + jx_{12} \dot{I}_{2n} [\text{V}] \cdots \textcircled{4}$$

#### 3. ベクトル図の作成

④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)

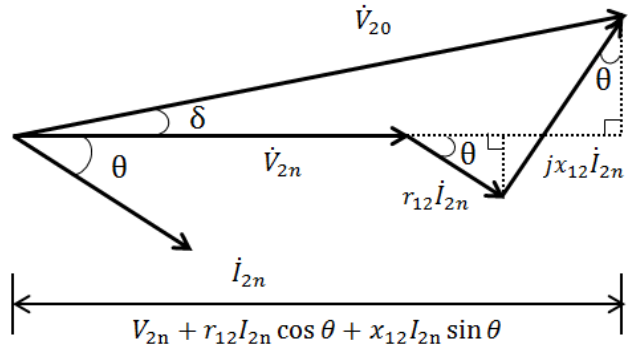


図3: ベクトル図

図3にて相差角 $\delta$ が十分小さいものと考えられるとき、次式が成り立つ

$$V_{20} \approx V_{2n} + r_{12} I_{2n} \cos \theta + x_{12} I_{2n} \sin \theta \cdots \textcircled{5}$$

#### 4. 電圧変動率 $\varepsilon$ [%]の導出

⑤式を電圧変動率の定義式(③式)に代入する。

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{V_{20} - V_{2n}}{V_{2n}} \times 100 \\ &\approx \frac{V_{2n} + r_{12} I_{2n} \cos \theta + x_{12} I_{2n} \sin \theta - V_{2n}}{V_{2n}} \times 100 \\ &= \frac{r_{12} I_{2n} \cos \theta}{V_{2n}} \times 100 + \frac{x_{12} I_{2n} \sin \theta}{V_{2n}} \times 100 \\ &= p \cos \theta + q \sin \theta [\%] \cdots \textcircled{5} \end{aligned}$$

以上が電圧変動率の簡易式の導出であり、電験3種では通常⑤式(簡易式)を用いて電圧変動率を求める。

#### <ポイント>

- 電圧変動率の導出は、電力科目の短距離送電線の電圧降下式の導出と非常によく似ている。共に頻出分野であるため、「等価回路→電圧則→ベクトル図→式の導出」を繰り返し学習し、確実に理解してほしい。このように、他科目との

リンクは多々あるので、これらを意識して学習すると効率的である。

- ・ 変圧器の原理は、理論で学んだ電磁誘導を利用したものであり、その理解が変圧器の学習のスタートである。
- ・ 本問でわかるように、短絡試験ではインピーダンスワットとインピーダンス電圧を計測し、それらを用いて%インピーダンスと%抵抗降下と%リアクタンス降下を求めることができる。(合成巻線抵抗と合成漏れリアクタンスで合成インピーダンスを求めることもできる。)
- ・ %Zを使用すれば変圧器の巻数比換算が不要になるため、電力系統の計算では%Zが多用される。
- ・ 変圧器二次側の短絡時に、一次側に定格一次電圧 $V_{1n}$ [V]を加えたときに流れる短絡電流 $I_s$ [A]は、比例関係から次式で示すことができる。

$$I_s = \frac{V_{1n}}{V_s} I_{1n} = \frac{100}{\%Z} I_{1n}[\text{A}]$$

短絡電流は、%Zと逆比例の関係があり、インピーダンスを増加させれば短絡電流を抑制できるが、電力系統の安定度の低下に繋がり、総合的な検討が必要になる。