

電験徒然草 第64段

同期発電機の電圧変動率 $\sim 100\%$ といふことは2倍にはね上がる $\sim$

(1/4)

第57段で変圧器の電圧変動率と取り上げたら、考え方は同期機も同様である。

まずは過去問から。

【令和4年1種 機械・制御問1】

定格電圧(相電圧)が V_n [p.u.]、定格電流が I_n [p.u.]、定格力率が $\cos \theta_n$ (80%遅れ)、及び同期リアクタンスが X_s である三相円筒形同期発電機に関して、次の問に答えよ。なお、単位法は自己定格容量及び自己定格電圧を基準とし、電機子抵抗や磁気飽和は無視する。

(1) この発電機のフェーザ図と端子電圧(相電圧)を基準として描き、図中に V_n , I_n , $jX_s I_n$, θ_n , 及び定格時の無負荷誘導起電力 E_n を示せ。

(2) 同期機の電圧変動率 ε [%] は、定格運転状態から回転速度と界磁電流と一定に保って無負荷にしたときの端子電圧の変化率と表わしにものである。 ε [%] を表す式を E_n と V_n を用いて示せ。

(3) フェーザ図から、 E_n と V_n , θ_n , 及び $X_s I_n$ で表わす式を導出し、さらに ε と V_n , θ_n , 及び $X_s I_n$ を用いて表す式を示せ。

(4)

a. この発電機の同期リアクタンス X_s を 1.25 p.u. とし、電圧変動率 ε の値を求めよ。

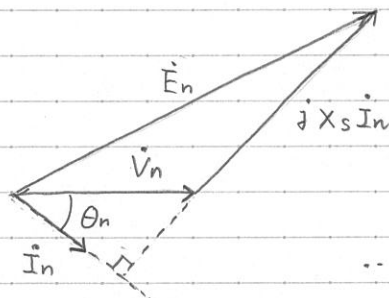
b. 次に、この発電機を定格電圧、定格電流、及び力率100%で運転する場合に、そのときの端子電圧の変動率 ε' [%] の値を求めよ。ただし、 ε' は、任意の運転状態から無負荷にした場合の端子電圧の変動率とする。

c. 上記の問題の結果のように同じ発電機でも力率が80%と100%の場合で電圧の変動率が異なる理由を、150字を上限としてできるだけ簡単に述べよ。

(5) 同期発電機の電圧変動率 ε は、短絡比が大きい発電機の方がより小さい値になる。発電機の定格力率が80%遅れの場合、その電圧変動率 ε が50%になるような発電機の同期リアクタンスを求めよ。

【解答】

(1) フェーザ図は下記のとおり。



... (答)

短絡比 (k_s) 大
 $\Downarrow$ [X_s [p.u.] = $1/k_s$]
 同期リアクタンス (X_s) 小
 $\Downarrow$
 電機子反作用 ($X_s I_n$) 小
 $\Downarrow$
 電圧変動率 小

~100%ということは2倍には収束する~

(2/4)

(2) 電圧変動率 ε [%] は,

$$\varepsilon [\%] = \frac{E_n - V_n}{V_n} \times 100 [\%] \quad \dots \textcircled{1} \quad \left(\frac{\%}{\%}\right)$$

左の解答は三角形 ABC から、三角形 ABD から
同じ結果を得る。 A

Diagram illustrating the derivation of the same result from two different triangles, ABC and ABD, using vector analysis. The diagram shows points A, B, C, and D. Vectors E_n , V_n , I_n , O_n , and $X_s I_n$ are shown. Angles θ_n are indicated. A dashed line connects C and D, and a right angle is marked at D. The text "[相似]" (Similar) is written near the dashed line CD.

(3) フェ-サ"区より

$$\begin{aligned}
 E_n &= \sqrt{(V_n \cos \theta_n)^2 + (V_n \sin \theta_n + X_s I_n)^2} \\
 &= \sqrt{V_n^2 \cos^2 \theta_n + V_n^2 \sin^2 \theta_n + 2 V_n X_s I_n \sin \theta_n + (X_s I_n)^2} \\
 &= \sqrt{V_n^2 + 2 V_n X_s I_n \sin \theta_n + (X_s I_n)^2} \quad [\text{p.u.}] \dots (2) \quad (\text{答})
 \end{aligned}$$

②式を①式に代入して

$$\epsilon = \frac{\sqrt{V_n^2 + 2 V_n X_s I_n \sin \theta_n + (X_s I_n)^2} - V_n}{V_n} \times 100$$

$$= \left[\sqrt{1 + 2 \frac{X_s I_n}{V_n} \sin \theta_n + \left(\frac{X_s I_n}{V_n} \right)^2} - 1 \right] \times 100 [\%] \dots (3) \quad \left(\frac{7}{6} \right)$$

$\left[\begin{array}{l} [] \text{内は p.u. 値なの?} \\ V_n \text{ 1 p.u. とするよう変換} \end{array} \right]$

(4)

a. ③ 式に $V_n=1$, $X_S=1.25$, $I_n=1$, $\sin \theta_n = \sqrt{1 - \cos^2 \theta_n} = \sqrt{1 - (0.8)^2} = 0.6 \text{ 代入して}$

$$\varepsilon = \left(\sqrt{1 + 2 \times 1.25 \times 0.6 + (1.25)^2} - 1 \right) \times 100$$

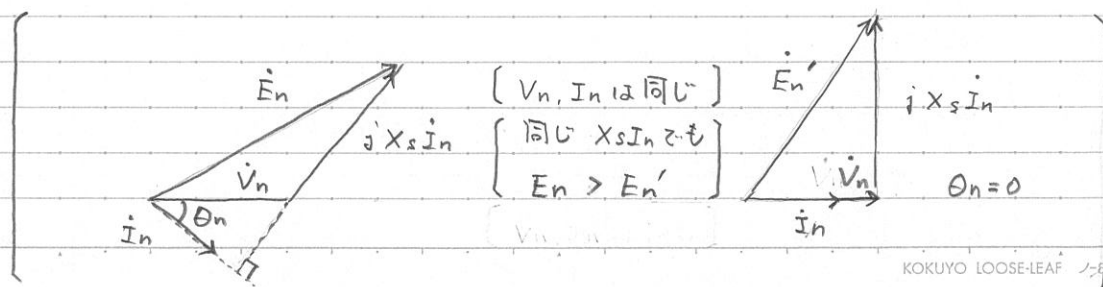
$$= 101.56 \rightarrow 102 [\%] \quad \dots (\text{答})$$

b. ③ ① $V_n = 1$, $X_s = 1.25$, $I_n = 1$, $\sin \theta_n = 0$ (功率 100%) 代入 12

$$\begin{aligned}\varepsilon' &= (\sqrt{1 + 2 \times 1.25 \times 0 + (1.25)^2} - 1) \times 100 \\ &= 60.078 \rightarrow 60.1\% \dots \left(\frac{1.25}{0}\right)\end{aligned}$$

C. (試験セツ-標準解答)

力率 $\cos \theta$ が遅れ 80% の場合では電機子反作用中に減磁作用成分が含まれるので、力率 $\cos \theta$ が 100% では電機子反作用は交差磁化作用となる。このため端子電圧を 1 p.u. にするため界磁電流すなわち無負荷誘導起電力は、力率 100% より遅れ力率 80% の場合の方が大きくなり、電圧変動率 ε は遅れ力率 80% の場合の方が大きくなる。



同期発電機の電圧変動率 $\sim 100\%$ ということば2倍にはね上がる～

(3/4)

(5) $\varepsilon = 50\%$ とするためには $E_n = 1.5$ [p.u.] であれば良い。

$E_n = 1.5$ とする発電機の同期リアクタンス X_{s1} とし、②式に $V_n = 1$, $I_n = 1$, $\sin \theta_n = 0.6$ と代入すると

$$E_n = \sqrt{V_n^2 + 2V_n X_{s1} I_n \sin \theta_n + (X_{s1} I_n)^2}$$

$$= \sqrt{1 + 2X_{s1} \times 0.6 + X_{s1}^2}$$

$$\therefore 1.5^2 = X_{s1}^2 + 1.2X_{s1} + 1$$

$$\therefore X_{s1}^2 + 1.2X_{s1} - 1.25 = 0$$

$$\therefore X_{s1} = \frac{-1.2 \pm \sqrt{(1.2)^2 + 4 \times 1.25}}{2}$$

$X_{s1} > 0$ とする

$$X_{s1} = 0.66886 \rightarrow 0.669 \text{ [p.u.]} \quad \dots (\text{答})$$

以上で解答終了。

小問(4) a. では同期リアクタンス $X_s = 1.25$ [p.u.] とし、定格電圧、定格電流、力率 80% 遅れで運転中からの電圧変動率を計算し、

$$\varepsilon = 10.2 [\%]$$

を得た。

計算すると6割にそうなるみたい、よくよく考えてみると定格から無負荷になる(負荷が一瞬でなくなる)とき端子電圧が2.02倍にはね上がることを意味する。

大容量

実際の7-ヒン発電機では、現在は、定格力率 0.9 が多く、短絡比は 0.58 以上が標準である。短絡比を 0.58 とし同期リアクタンス X_{s1} は

$$X_s = \frac{1}{0.58} \approx 1.72 \text{ [p.u.]}$$

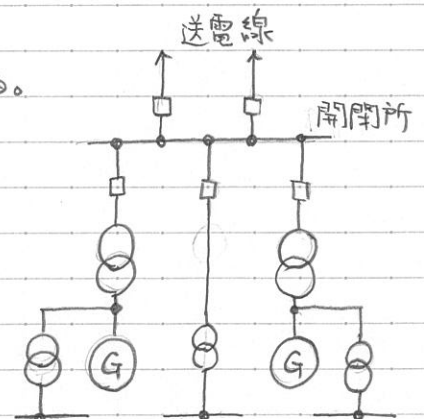
とするとき $\sin \theta_n = \sqrt{1 - (0.9)^2} = 0.436$ も代入して

$$\varepsilon = (\sqrt{1 + 2 \times 1.72 \times 0.436 + (1.72)^2} - 1) \times 100$$

$$= 134 [\%]$$

つまり、無負荷になると端子電圧は定格の2.34倍になることになる。

発電所開閉所の母線事故により母線保護で発電機が断絶されると、電圧がなくなり、電機子反作用がなくなる(所内単独運転機能がある場合は所内電力相当分は残る)。そのため端子電圧ははね上がるというので、自動電圧調整装置(AVR: Automatic Voltage Regulator)が電圧偏差を検知し、急激に界磁電流を絞り込むことで計算された電圧までは達せり、最終的に定格電圧に落ち着く。



同期発電機の電圧変動率 $\sim 100\%$ といふことは2倍にはね上がる～

(4/4)

一方で負荷がなくなると蒸気タービンと発電機は加速する。蒸気タービンは調速機(速度偏差見合いて蒸気加減弁開度を変化させる)が動作し、非常調速機(回転数が定格速度の $110 \pm 1\%$ で蒸気タービンをトリップさせる機能)が動作することなく、所定の速度に落ち着く。

事業用の蒸気タービン発電機の設置工事完了後、使用前検査と実施するが、試験項目の一つに「負荷しゃ断試験」がある。系統に接続し、定格負荷で運転している状態から、手動でしゃ断器を切り、上記のようにトリップすることなくタービン速度と発電機電圧が所定の値に落ち着くことを確認する。

余談であるが、大容量のタービン発電機の試験となると、一瞬で発電機が担っていた供給が喪失するので、実施する時間は正午(昼休みで需要が急減する)とし、中央給電指令所と連携を取って(揚水発電機を待期させておく)実施する。