UDC 621.313.322.045.31.015.2: 621.316.722.1.077.6

論 文

53-B 23

自励交流発電機の電圧確立方式と直流 チョッパによる定電圧制御

正 員 野 中 作太郎 (九 大)

正 員 袈裟丸 勝 巳 (九 大)

1. ま え が き

自励交流発電機は、普通自己の発生した電力の一部を半導体整流器によって整流し、これを直接ブラシとスリップリングを通して界磁巻線に供給する方式を言うが、間接的に交流励磁機の固定子界磁巻線を励磁するブラシなし励磁方式も自励式といえる。いずれの場合も、主磁極（後者の場合は交流励磁機の界磁極でもよい）の残留磁束を利用して電圧の自己確立を行なうが、励磁回路には半導体整流器がそう入されているため、その順電圧降下より発電機残留電圧が大でなければ励磁電流が流れず電圧の自己確立は起こらない。

残留電圧を大きくするためには界磁極・継鉄の材料に残留磁気エネルギーの大なるものを使用し、エアギャップ長を普通より小さくする必要があるが、界磁調整による電圧制御の直線性・速応性、電機子反作用リアクタンス降下などの点で運転特性上はマイナスの影響を与える。従って、蓄電池など別電源が得られる場合は、これにより初期励磁を行えば残留電圧に頼らなくても電圧確立が可能なので、発電機は定常運転に適した設計ができ特性上有利となる。しかしながら、この場合蓄電池は電圧が確立するまでの短時間の電力消費で済むが矢張り充電など保守点検を必要とし、自励発電機の特長であるほかに何らの補助電源を必要としないという点は失なわれる。

本稿はまず、自励三相交流発電機の界磁巻線は普通ブリッジ結線の全波整流回路の整流器に接続されているため、界磁巻線内に誘導される起電力から眺めた界磁回路は整流器で短絡された半波整流回路を構成することに着目し、著者の一人野中らが前に開発したブラシなし自励形単同期発電機^{(1)~(4)}の原理を応用して、

三相発電機の任意の出力端子間に比較的小容量のコンデンサを、押しボタンスイッチによってごく短時間接続するだけで容易に電圧確立を得る方式を提案するのである⁽⁵⁾。

また、自励交流発電機の負荷変動に対する自動電圧調整には従来、発電機端子電圧からリアクトルを通して供給される励磁電流に変流器から負荷電流に比例した励磁電流をベクトルの付加し、これを整流器で直流に変換して界磁巻線に供給する複巻方式が多く採用されている⁽⁶⁾。しかし、漁船の集魚燈用発電機などのように原動機回転速度が比較的大幅に変動する用途に対して、その周波数変動にかかわらず発電機出力電圧を一定に制御しようとする場合、複巻方式は原理的に不適当で、強いて定電圧に制御しようとするれば複雑な電圧修正回路を付加する必要がある。

そこで本稿は、保守の容易なブラシなし自励三相交流発電機を対象に、その交流励磁機の界磁電流を直流チョッパで制御する比較的簡単な回路構成により、広範囲の速度変動や負荷変動に対して発電機出力電圧を一定に制御できる方式を示し、上述の電圧確立回路を併用することによって電圧の自己確立が確実にしかも確立時間が短く、定常ならびに過渡変動に対して良好な定電圧特性が得られることを実験的に明らかにしたものである。

2. 電圧確立方式

〈2・1〉 適用回路例 第1図は自励複巻交流発電機の代表的回路例として並列リアクトル方式を示す。図のように、出力電圧に比例する成分はリアクトル X を通して、また出力電流に比例する成分は変流器 CT によって取出し、これらを整流器 Rec で直流に変換して発電機界磁巻線 F_G に供給する。可飽和リアクトル SX の制御電流を自動電圧調整器 AVR によって加減することにより電圧調整を行なう。

このような回路構成では、残留電圧によって電圧確立を行なうには整流器の順電圧降下とスリップリング

A Voltage Build-Up Method of Self-Excited AC Generator and its Constant Voltage Control by DC Chopper. By Sakutaro Nonaka, Member & Katsumi Kesamaru, Member (Faculty of Engineering, Kyushu University).

野中作太郎：正員，九州大学工学部電気工学科
袈裟丸勝巳：正員，九州大学工学部電気工学科

第 1 図 自励複巻交流発電機 (並列リアクトル方式の例)

Fig. 1. Self-excited compound AC generator (example of parallel reactor system).

第 2 図 ブラシなし自励方式

Fig. 2. Brushless self-excitation system.

・ブラシ間の接触抵抗による電圧降下に打勝って界磁電流を流す必要があり、電圧上昇が比較的困難である。そこで、図に示すように任意の出力端子間に適当な容量の電解コンデンサ C を押しボタン SW を介して接続すれば電圧確立が容易となる。

第 2 図は最近メンテナンス・フリーの立場から、数 kW のポータブル発電機から数百 MW のタービン発電機に至るまで盛んに採用されるようになったブラシなし励磁方式の自励回路の例を示す。直結交流励磁機の電機子 W_{EX} は、同じ回転軸上に取付けた半導体整流器 Rec 1 を通して主発電機の界磁巻線 F_G に直接接続されるため回転部はブラシなし構造となる。この交流励磁機の固定子界磁巻線 F_{EX} を、第 1 図の主界磁 F_G と同様の回路構成で励磁すればブラシなし自励交流発電機が得られる。この場合も C による電圧確立補助回路は非常に有効である。

第 3 図は直流チョップ制御ブラシなし自励方式を示すが、実験機のように比較的小容量の発電機では図のように回転整流器は半波整流回路で構成される場合もあり、その場合は環流ダイオード D_F を付加すれば、 C による電圧確立は有効に動作する。

〈2.2〉 電圧の自己確立の原理 第 1 図～第 3 図のいずれの回路構成の場合も、押しボタン SW を押すことによって発電機線間にコンデンサ C が接続され

第 3 図 直流チョップ制御ブラシなし自励方式
Fig. 3. Brushless self-excitation system controlled by DC chopper.

第 4 図 ブラシなし自励形単相同期発電機の回路

Fig. 4. Circuit diagram of the brushless self-excited single-phase synchronous generator.

界磁回路は半波整流回路を構成しているので、第 4 図に示すようなブラシなし自励形単相同期発電機⁽¹⁾の回路が形成される。従って、残留電圧によってコンデンサ C に進相電流 I_c が流れ、その単相電機子反作用のうち正相分回転磁界の増磁作用により次第に電圧と電流が増大して、いわゆる自己励磁現象を生じるとともに逆相分回転磁界は同期速度の 2 倍の速度で界磁巻線 F_G と鎖交するので、界磁巻線には 2 倍の周波数の交流電圧を誘導し、これが整流器 Rec または環流ダイオード (第 3 図 D_F) により構成された半波整流回路によって整流されて界磁の自己励磁が起こり、電圧は急速に上昇する。電圧上昇の途中で正規の自励回路が働き、更に電圧の上昇速度が加速され急速に電圧が確立する。以後は押しボタン SW を離して C を切離しても電圧は保持される。

〈2.3〉 電圧確立用コンデンサ容量 本電圧確立方式は電圧確立の初期において、まず残留電圧による極めて小さい C の進相電流が流れるが、この進相電流の逆相分回転磁界によって界磁巻線 F_G に誘導される電圧は小さく、しかも整流器 Rec の順方向電圧降下の

ために界磁整流電流 i_f はほとんど流れない。従って発電機の端子電圧は、まず I_c の正相分回転磁界による自励作用によって上昇し、端子電圧の上昇につれて I_c も増加し、界磁誘起電圧も増加するので i_f の自励効果が現われてくると考えられる。

しかるに発電機の残留磁気小さい場合でも電圧を確実に確立させるためには、 C の値として界磁を無励磁の状態にコンデンサ自励単相発電機として電圧が確立するために必要な、次の条件式を満足することが必要である⁽¹⁾。

$$C \geq \frac{1}{2\pi f} \frac{I_n}{V_n} \frac{\gamma}{1+\sigma} \quad \dots\dots\dots (1)$$

但し、 f : 発電機出力周波数、 I_n : 発電機定格電流、 V_n : 発電機定格電圧、 σ , γ : 無負荷飽和曲線と単相短絡曲線から求まるそれぞれ飽和率および短絡比である。

従って、発電機の飽和率 σ および短絡比 γ が実験または設計資料から既知であれば、(1)式を使用して電圧確立に必要な C の値を決定できる。また(1)式において、電圧確立に必要な C の最小値は $\gamma/(1+\sigma)$ が f に反比例することから、 f の2乗に反比例する。

3. 直流チョップによる電圧制御方式

〈3・1〉 回路構成 第3図に本方式の回路の一例を示した。主発電機の固定子には実験機では自励回路用として補助巻線 W_A を巻いているが、主巻線 W_M にタップを出してこれから電圧を取出すことも可能である。 W_A の出力を Rec2 で直流に変換し、これを直流チョップ回路で制御して交流励磁機の固定子界磁巻線 F_{EX} に供給する。

チョップのゲート制御回路は比較回路、増幅器、パルス発生器から構成され、比較回路によって出力端子電圧と基準電圧の差が検出され、チョップ回路の ON に対する OFF のゲート信号の印加時期が制御されるようにしている。従って、発電機端子電圧は可変抵抗 VR によって設定された値に自動的に保持される。

〈3・2〉 直流チョップ回路 第3図に示す Jones 形チョップ回路⁽⁷⁾は転流コンデンサ C_0 が常にある値に充電されているから転流動作が確実で、始動のための特別の回路を必要としない特長がある。

第5図にゲート制御回路の詳細を示す。ゲート回路用電源としては、特別の補助電源を使用しないので、(a)図の比較回路において出力電圧検出用として、発電機端子電圧を PT を通して Rec3 で整流し、 R_1 と C_1 で平滑した直流電圧(図中 $\oplus\ominus$)を(b)図のゲートパルス発生回路の電源にも併用し、これを R_3 とツェナーダイオード ZD_3 で分圧して ZD_3 の定電圧を利用するようにしている。従って、発電機の電圧が十分に確立せずツェナー電圧に達していないときは制御回路としての機能を発揮しないけれども、前述の電圧確立補助回路の作用で一度電圧が ZD_3 電圧以上に達すれば後は制御回路が動作し、正常の励磁回路によって発電機は自励発電を維持するようになる。

チョップ回路の T_M へのゲート信号すなわち ON パルスは UJT によって一定周期で発振され、このパルスは同時に遅延回路に印加され、制御入力によって決まる時間遅れをもって OFF パルスが生成される。この OFF パルスは遅延パルス整形回路で整形され T_s のゲートへ印加される。制御入力は(a)図に示すように発電機端子電圧と基準の ZD_2 電圧とを差動増幅す

第5図 チョップのゲート制御回路

Fig. 5. Gate control circuit for the chopper.

る比較回路によって作られ、設定電圧は可変抵抗 VR によって調整できるようになっている。

発電機端子電圧が基準値以上に上昇すれば、差動増幅器によって制御入力が増加し、遅延回路において、ON ゲート信号に対する OFF ゲート信号の印加時期が早くなる。すなわち、チョップの入力電圧を E_d 、出力電圧平均値を E_{fE} 、オン期間を T_{on} 、チョップ周期を T とすると、通電率 α は $\alpha = E_{fE}/E_d = T_{on}/T$ であり、 T_{on} が小さくなると交流励磁機界磁電圧 E_{fE} は小さくなり、結果として、発電機端子電圧は降下する。また、発電機端子電圧が基準値以下になれば上述と逆の現象が起り、出力電圧は一定に制御される。

〈3・3〉 電圧制御 第3図において、補助巻線 W_A の漏れリアクタンスに起因した $Rec2$ の重なり角を無視し、チョップ回路を理想的な直流変圧器とすれば、一般に交流励磁機の界磁巻線のインダクタンス L_{fE} は巻線抵抗 R_{fE} に比べて大きいのでチョップ周期 T に対して $L_{fE}/R_{fE} > T$ となり、界磁電流 I_{fE} は連続となる。従って任意の主発電機端子電圧 V に対して交流励磁機の界磁電流 I_{fE} は次式のようになる。

$$I_{fE} = \frac{\alpha E_d}{R_{fE}} = \frac{\alpha k}{a R_{fE}} V \quad \dots\dots\dots (2)$$

但し、 $k=3\sqrt{2}/\pi$ 、 a ：補助巻線 W_A の主巻線 W_M に対する実効巻数比。

上式は自励回路の抵抗曲線である。従って、発電機の広範囲な回転速度の変化および負荷の変化に対して定電圧制御を行なうためには、巻数比 a を小さくして E_d を大きくし、 I_{fE} の可変範囲を大きくする必要がある。この場合、不必要に a を小さくすると自励装置の容量が増加することになるので、適切な定電圧補償範囲を設定して a を決定することが望ましい。

4. 実験結果

第3図と第5図に示す回路構成で直流チョップ制御

第7図 電圧確立過程を示すオシログラム ($C=100\mu F$)

Fig. 7. Transient phenomena of voltage build-up.

第6図 回転速度に対する電圧確立可能な C の最小値

Fig. 6 Minimum value of condenser for voltage build-up vs. speed.

自励交流発電機の実験を行なった。主発電機の定格は 5kVA, 220V, 13.2A, 60Hz, 2極 (突極形) であり、交流励磁機は 6極、回転整流器は環流ダイオード付三相半波整流回路を採用している。

〈4・1〉 電圧確立 第6図は本発電機において、電圧を確立するために必要な C の最小値を示す。図から電圧が確立する C の最小値は周波数 f のほぼ2乗に反比例して変化することがわかる。なお、 $f=60\text{Hz}$ において、 $C \geq 55\mu F$ であれば電圧確立が可能であることを示している。第7図はチョップ周波数 $f_c=100\text{Hz}$ とし、無負荷回転速度 $n=3,700\text{rpm}$ (61.7Hz) 一定として発電機固定子線間 WU にコンデンサ $C=100\mu F$ を投入し、約1秒後に切離したときの電圧確立過程を示すオシログラムである。コンデンサ投入後約0.3秒でチョップ回路が動作し、通電率 α は瞬時に大きくなりチョップ出力電圧 E_{fE} は急速に上昇する。電圧確立後はコンデンサその入による電圧上昇を抑えるために、 α が小さくなって V_{UV} をほぼ定格電圧に維持していることがわかる。またコンデンサ切離後、数サイクルのわずかな過渡変動を経て、定格電圧に落ち着いている。 I_{fE} は交流励磁機の界磁電流を示す。なおコンデンサ投入後、定常値に達するまでの電圧の確立時間

第 8 図 無負荷電圧と通電率の関係

Fig. 8. Relation between no load voltage and duty factor.

は発電機の残留電圧やコンデンサ容量などによって異なるが、実験機の残留線間電圧は、 $n=3,700\text{rpm}$ で約 1.6V 、電圧確立時間は約 0.5 秒である。

〈4.2〉 定常特性 第 8 図は本発電機の交流励磁機の界磁を別直流電源により励磁した場合の無負荷飽和曲線を示す。図中の直線は α をパラメータとした自励回路の抵抗曲線であり、 $f=60\text{Hz}$ の場合、無負荷定格電圧 V_0 は $\alpha=0.30$ で得られることを示している。なお、 $\alpha=0.73$ は本実験で設定した通電率の上限値を示す。第 9 図はチョップ周波数 $f_c=100\text{Hz}$ 、発電機出力周波数 $f=60\text{Hz}$ の場合の抵抗、誘導性 ($\text{PF}=0.6$)、容量性 ($\text{PF}=0.6$) の各負荷に対する特性を示す。誘導性負荷のときには負荷の増大に伴い電機子反作用 (減磁作用) による電圧降下を補償するために抵抗負荷時よりも通電率 α の増加の割合が大きくなり、また容量性負荷のときは増磁作用による電圧上昇を補償するため、 α は逆に減少して、端子電圧を保持していることがわかる。

第 10 図はチョップ周波数 f_c を $100, 133, 200\text{Hz}$ とした場合の回転速度の変化に対する無負荷特性を示したものである。各場合とも定格速度 $3,600\text{rpm}$ に対し $\pm 600\text{rpm} (\pm 10\text{Hz})$ 程度の変化であれば、 $\pm 2.3\%$ 以内の電圧変動に抑えられることがわかる。 f_c による差異はほとんど認められないが、 f_c が大きい場合チョップ回路における損失も大きくなるため電圧変動がごくわずかに大きくなっている。なお $f_c=200\text{Hz}$ での負荷特性で第 9 図とほとんど同じ結果が得られた。

第 11 図は $f_c=100\text{Hz}$ とし、定格速度で負荷電流 $I_U=7.9\text{A}$ になるように抵抗、誘導性、容量性各負荷

第 9 図 負荷特性 ($f=60\text{Hz}$, $f_c=100\text{Hz}$)

Fig. 9. Load characteristics.

第 10 図 速度による無負荷端子電圧の変化

Fig. 10. Variation of terminal voltage with speed at no load.

を調整した後一定にして、回転速度の変化に対する端子電圧 V_{UV} 、通電率 α 、交流励磁機界磁電流 I_{fE} の変化を示したものである。この場合、チョップ回路の転流失敗を防ぐために第 5 図 (b) の遅延回路における R_2 を調整して、通電率 α がある一定の値以上には増加しないように設定している。図は α の上限を 0.73 に抑えた場合を示す。従って負荷状態によっても異なるが、回転速度が減少して α が設定値に達すると、それ以上には増加しないので速度の減少とともに I_{fE} が減少し、発電機端子電圧は低下している。定電圧を維持するためには低速になるほど、また負荷が誘導性になるほど大きな励磁電流を必要とするが、誘導性負

第 11 図 速度による負荷時端子電圧の変化
Fig. 11. Variation of terminal voltage with speed at load.

(a) 無負荷時の異なる回転速度に対する波形

(b) 力率の異なる負荷に対する波形 ($f=60\text{ Hz}$)

第 12 図 交流励磁機界磁電圧と電流波形
($f_c=100\text{ Hz}$)

Fig. 12. Field voltage and current waveforms of the AC exciter.

荷の場合低速での補償が α の上限設定値で抑えられるため、定電圧制御の可能な速度範囲は他の負荷に比して狭くなる。なお、 α の上限設定は抵抗や誘導性負荷の過負荷に対しても同様に動作するので発電機の保護にもなる。

第 12 図(a)は無負荷時の異なる回転速度に対して (b)図は力率の異なる負荷に対して、それぞれ交流励磁機界磁電圧 E_{FE} と電流 I_{FE} の定常波形を示したも

のである。ここで、(a)図の波形は第 10 図の $f_c=100\text{ Hz}$ の場合に、また(b)図の波形は第 11 図の $I_U=7.9\text{ A}$ の場合に対応している。 I_{FE} の波形は交流励磁機の界磁インダクタンス $L_{FE}=325\text{ mH}$ で、界磁抵抗 $R_{FE}=9.1\Omega$ に比べて比較的大きいため平滑インダクタンスの役目をし、チョッパ周期を通じてオン・オフの区別なくほぼ一定となっているが、波形自体はチョッパ周期と無関係なリップルを示している。これは励磁機の電機子電流は三相半波整流されるため高調波成分を含み、その結果励磁機界磁巻線 F_{EX} にも高調波成分が誘導されるためである。

〈4.3〉 過渡特性 第 13 図(a)は $f_c=100\text{ Hz}$, (b)図は $f_c=200\text{ Hz}$ の場合に、それぞれ 3.08 kW の抵抗負荷を投入したときの負荷電流 I_U , 発電機端子電圧 V_{UV} , 交流励磁機界磁電圧 E_{FE} と電流 I_{FE} の過渡状態を示すオシログラムである。各々の場合、原動機の回転速度も若干変動しているが、その周波数変

(a) 抵抗負荷 (3.08 kW) 投入 ($f_c=100\text{ Hz}$)

(b) 抵抗負荷 (3.08 kW) 投入 ($f_c=200\text{ Hz}$)

(c) 誘導性負荷 (2.44 kW , $\text{PF}=0.8$) 投入 ($f_c=200\text{ Hz}$)

第 13 図 負荷投入時の波形

Fig. 13. Transient waveforms when generator is suddenly loaded.

(a) 抵抗負荷しゝ断

(b) 誘導性負荷しゝ断

第 14 図 負荷しゝ断時の波形 ($f_c=200\text{ Hz}$)

Fig. 14. Transient waveforms when generator suddenly loses its load.

動に対しても、ほぼ定電圧を維持していることがわかる。負荷の投入に対して E_{FE} の波形でチョップの通電率 α はほとんど瞬時に増加しており、チョップのゲート制御回路の時間遅れは無視できる程度であることがわかる。但し (a) 図の $f_c=100\text{ Hz}$ の場合、負荷投入がたまたまチョップのオフ期間で行なわれているため、次のオン期間で応答している。従って、チョップ周波数が低い場合にはその分だけ速応性が悪くなることがわかる。

また、(c) 図は $f_c=200\text{ Hz}$ の場合に、誘導性負荷 (2.44 kW , $\text{PF}=0.8$) を投入したときのオシログラムを示す。この場合も負荷の投入に対応してチョップの通電率 α の瞬時的増加が見られ、負荷の急増、回転速度の減少による電圧降下を補償していることがわかる。更に本発電機は、 2.2 kW гэ 形誘導電動機の始動時の過負荷に対しても十分耐えることが実験によって確かめられている⁽⁸⁾。

第 14 図 (a), (b) はそれぞれ、第 13 図 (b), (c) に示した抵抗および誘導性負荷をしゝ断したときのオシログラムである。 E_{FE} の波形から、負荷のしゝ断に対してチョップ通電率 α は直ちに減少して、負荷の急減、回転速度の上昇に伴う端子電圧の上昇を抑制していることがわかる。

5. む す び

以上、普通の静止励磁方式の自励交流発電機ならびに交流励磁機と回転整流器を用いるブラシなし自励交流発電機の電圧確立方式として、発電機の 2 端子間に比較的小容量のコンデンサをごく短時間接続するだけの非常に簡単な方法を提案し、これをブラシなし自励三相交流発電機に実施して、残留電圧だけでは電圧の確立が困難な場合でも容易に電圧が確立することを実験的に確め、本方式の実用性を示した。

本方式を採用すれば、自励発電機として特に残留磁気を大きくする特別の設計を施す必要がなく、また電圧確立のための初期励磁用別電源も不要で、コンデンサは電圧が確立するまでの数秒間使用するだけであるから、短時間定格の電解コンデンサを用いることができ、小形化できる。

また、直流チョップによる電圧制御方式は、

(1) 原動機の広範囲な速度変動ならびに力率の異なる負荷変動に対し定電圧制御が可能である。

(2) チョップ周期の一サイクル応答が可能である。従って、チョップ周波数を増大することによって速応性を向上できる。

(3) 他の定電圧制御方式に比べ制御回路が簡単になり制御電力もきわめてわずかでよい。従って制御装置は非常に小形軽量となる。

などの特長を有し、電圧確立方式との併用により、ブラシなし自励方式として実用化が期待できる。

終りに、発電機の試作にご協力いただいた東洋電機工業株式会社代表取締役 荒岡宏俊氏、ならびに実験にご協力いただいた九州大学技官 本田利雄氏に深く謝意を表す。

(昭和 51 年 8 月 5 日受付, 同 52 年 7 月 28 日再受付)

文 献

- (1) 野中: 「ブラシ無し自励形単同期発電機」 電学誌 82, 627 (昭 37-4)
- (2) 野中・牟田: 「ブラシなし自励形単同期発電機の解析的研究」 電学誌 86, 1140 (昭 41-7)
- (3) 野中・牟田: 「ブラシなし自励形単同期発電機の特長」 電学誌 91, 1291 (昭 46-7)
- (4) 野中・牟田: 「ブラシなし円筒界磁自励形単同期発電機の解析」 電学論 B 92, 205 (昭 47-3)
- (5) 野中・袈裟丸: 「自励三相交流発電機の電圧確立の一方式」 九大工学集報 46, 6, 714 (昭 48-12)
- (6) 例えば, 小田: 自励交流発電機 p. 13 (昭 42) 電気書院
- (7) GE 編: SCR マニュアル 4th. Ed. p. 714 (1967) オーム社
- (8) 野中・袈裟丸: 「直流チョップ制御自励交流発電機の過渡特性」 昭 49 電気四学会九州支大 No. 305