直流機の整流特性補償装置

正員 小原 春雄 (日立)
 正員 田原 和雄 (日立)
 非会員 小関 篤固 (日立)
 非会員 斉藤 安実 (日立設備エンジニアリング)
 非会員 鈴木 信孝 (日立エンジニアリング)
 正員 三木 孝司 (日立エンジニアリング)

1. ま え が き

直流機は古くから可変速電動機として広く産業用に適用されているが、最近の制御技術の進歩によって電氣的、機械的限界まで使用されるようになった。また、可変速範囲も大きく設定される傾向にあり、定常および過渡運転時の整流条件がますます厳しくなっている。この結果、常に安定した整流状態を得るには、広い無火花帯を有する直流機の開発と、精度の良い整流補償を行い無火花運転化を図る必要がある。

直流機本体の整流性能を改善する方法としては、電機子鉄心の同一スロット中の各整流コイルのインダクタンスと整流起電力とを等しくする新構成電機子巻線方式が提案されている⁽¹⁾⁽²⁾。

一方、広範囲の速度制御をする大形直流機では、回転速度によって無火花帯の幅が変化するだけでなく、無火花帯の位置が移動する現象が生じる。そして、この移動は高速運転時に、あたかも補極が強くなるように無火花帯が減励磁側へずれてきて、その程度の大きいものでは低速運転時と高速運転時の無火花帯の共通領域がなくなる。この対策としては、回転速度と負荷

電流の大きさに応じて補極の強さを調整すればよいことから、補極ダイバータ方式および直流励磁機を用いた補償方式が実用化された⁽³⁾。特に、補極ダイバータはコンタクタにより補極分路抵抗を変化させて補極巻線電流を段階的に調整する方式であるため、速度特性への影響およびメンテナンスの面で改善が望まれていた。このため、著者らはさきに、補極に補極磁束の大きさと分布形状を変化する補助巻線と偏磁巻線を設け、更に整流状態を主ブラシの後端部に検出ブラシを設けて検出し、両巻線の起磁力を整流状態の検出値に応じて制御することにより、ブラシ出入口からの火花発生を防止して良好な整流状態を維持できる整流制御方式を考案し、小形機(5kW機)を供試機にして、その有効性を確認した⁽⁴⁾。本整流制御方式を大形機に適用するには、信頼性の高い四象限運転に対応できる回路構成と制御方法の確立と共に、検出ブラシによる整流状態検出の代わりに、非接触式の整流状態検出方式を開発する必要がある⁽⁵⁾。

そこで、さきの補助ブラシにより整流状態を検出して整流補償を行う方式は、補助ブラシの信頼性に問題があると考え、実用化の第一段階としては補助ブラシを設けない、従来の補極ダイバータをエレクトロニクス化した整流特性補償装置の開発を進めた。すなわち、被直流機の回転速度と負荷電流の変化に対する無火花帯移動量をあらかじめ把握すれば、回転速度と負荷電流の検出値に対応して整流補償を行えばよい。今回、回転速度と負荷電流の検出値に応じて適切な整流補償指令を発生させる関数発生器を新たに加え、四象限運転に対応できる整流特性補償装置を試作した。そして、大形機を供試機にして性能評価を行った⁽⁶⁾。

Improving Equipment of the Commutation Quality of Direct Current Machines. By Haruo Koharagi, Member, Kazuo Tahara, Member (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.), Atsukata Koseki, Non-member, Yasumi Saitoo, Non-member (Hitachi Works, Hitachi Ltd.), Nobutaka Suzuki, Non-member (Hitachi Setsubi Engineering) & Koozi Miki, Member (Hitachi Engineering).

小原春雄: 正員, (株)日立製作所日立研究所
 田原和雄: 正員, (株)日立製作所日立研究所
 小関篤固: 非会員, (株)日立製作所日立工場
 斉藤安実: 非会員, (株)日立製作所日立工場
 鈴木信孝: 非会員, (株)日立設備エンジニアリング
 三木孝司: 正員, (株)日立エンジニアリング

本論文では、まず四象限運転に対応した整流特性補償装置の回路構成と制御方法を述べ、次いで過渡運転時における電源コンデンサの電圧および補助巻線電流の計算方法を明らかにする。そして、最後に 2,000 kW 機を供試機にした定常、過渡運転時の整流補償効果について述べる。

2. 無火花帯移動現象とその補償方法

図 1 に無火花帯移動現象とその補償方法を示す。無火花帯移動現象は、図中に示すように横軸に回転速度をとり（以下、横軸を負荷軸と呼ぶ）、縦軸にブラシから火花を発生しない領域を補極添加電流で表した無火花領域が、回転速度の上昇と共に減励磁側へ移動する現象を指す。これを補償する従来の補極ダイバータは回転速度を検出し、コンパレータによってコンタクタを切換え、補極分路電流を無火花帯中の一点鎖線に沿って段階的に調整する方式である。この方式は無火花帯幅が狭くなると整流補償が難しくなること、コンタクタ切換時に速度変動を生じさせる外乱になること、およびコンタクタ接点のメンテナンスが必要となるなどの問題点がある。

これに対し、今回の整流特性補償装置は、補極の根元に補助巻線を補極巻線とは差動に設け、負荷電流と回転速度とを検出し、この両検出値を関数発生器を介して掛算し、この出力信号に応じて外部電源からの補助巻線電流を無火花帯中の一点鎖線に沿って連続的に調整する方式である。この結果、直流機は常にブラシからの火花発生がない無火花帯中心で運転されることになる。

なお、関数発生器は非線形で変化する無火花帯の中心位置を模擬する回路であり、無火花帯中の一点鎖線は三段の関数発生器で模擬した場合を示した。

本整流特性補償装置を圧延機駆動用大形直流機に適

図 1 無火花帯移動現象とその補償方法

Fig. 1. No-spark zone drift and its compensating system.

用する場合は、四象限運転に対応できること、急しゅんな電流変化に追従できること、および直流機の異常時（例えばフラッシュオーバー事故に至り、電流変化が過大になった場合）においても適切な整流補償を行う必要がある。以下、これらの要求を満足できる整流特性補償装置の回路構成と制御方法および性能評価結果について述べる。

3. 整流特性補償装置の回路構成と制御方法

図 2 に今回試作した整流特性補償装置の構成図を示す。主回路は装置の小形化と制御の容易さからパワートランジスタを用い、その制御は補極磁束の脈動が整流性能に悪影響を与えることから、補助巻線電流の脈動を極力小さくするために PWM 制御方式を採用した。

また、電機子切換えによる逆転の場合、補助巻線の電流方向を切換える必要があるために、トランジスタ $Q_1 \sim Q_4$ を H 形に構成した。

無火花帯移動量の大きさと形態が機械によって異なるため、整流補償量を調整する制御回路は、回転速度と負荷電流とを検出して機械の無火花帯中心位置を模擬するための関数発生器へそれぞれ入力し、その出力を掛算器に入力する。この掛算器出力 I_{ax}^* は補助巻線の電流指令となり、PWM 制御回路により Q_1 と Q_4 および Q_2 と Q_3 を交互に、かつ常にオン・オフして補助巻線電流 I_{ax} を制御する構成としている。

図 3 に関数発生器と整流補償指令とを示す。関数発生器は三段のアナログ回路で構成し、一方の回転方向に対する動作を示した。すなわち、第一段目は負方向にゲインを大きくし、第二段目は回転速度 N_1 から正方向にゲインを小さく、更に第三段目は回転速度 N_2

図 2 整流特性補償装置の構成図

Fig. 2. System of improving equipment of commutation quality.

図3 関数発生器と整流補償指令

Fig. 3. A function generator and commutation compensating command.

図4 四象限運転における整流特性補償装置の動作

Fig. 4. Characteristics of improving equipment of commutation quality by four-quadrant operation.

から正方向にゲインを小さく設定した。それらの出力信号を合成すると、整流補償指令中に示すように、回転速度を横軸にとって表した無火花帯の中心の整流補償指令となる。

この三段の関数発生器を両回転方向に対応して設け、更に負荷電流に対して電圧出力信号が関数的に変化する三段の関数発生器を設けているので、本整流特性補償装置は回転速度および負荷電流に対応して無火花位置が任意に変化しても適切な整流補償指令が得られる。

図4は四象限運転における整流特性補償装置の動作を示す。整流特性補償装置は図中に示す、(イ)の回転速度、(ロ)の負荷電流が入力されると、回転速度を(ハ)

に示すように絶対値回路を介して掛算器に入力しているので、補助巻線の電流指令である(ニ)の掛算器出力 I_{ax}^* は、その方向が負荷電流の方向に必ず対応し、大きさは回転速度と負荷電流の積に比例する。この結果、補助巻線電流 I_{ax} は(ホ)に示すように、掛算器出力 I_{ax}^* に応じて電源から供給される。これにより、整流特性補償装置は四象限運転される直流機に対して良好な整流補償を行うことができる。ここで、補助巻線電流の脈動はPWM制御回路中のヒステリシスコンパレータのヒステリシス幅で決まる。

4. 過渡特性の計算方法

補助巻線には四象限運転時の補極巻線電流の急変などで補極磁束が変化すると変圧器作用で電圧を誘起し、この電圧が電源コンデンサの電圧より大きくなると、整流特性補償装置は電源側から補助巻線に電流を供給できず、制御不能になる恐れがある。整流特性補償装置の設計にあたっては、過渡運転時における整流補償の良否が重要となるため、過渡特性の計算方法について検討する。

〈4・1〉 整流特性補償装置の動作 図5に整流特性補償装置の動作説明図を示す。(a)図は負荷電流の急増時を示し、補助巻線には図中に示す方向の電圧 V_{ax} を誘起するので、トランジスタ Q_1 と Q_4 がオン時に電源コンデンサの電圧 V_c と誘起電圧 V_{ax} の和により、補助巻線電流 I_{ax} が急増する。トランジスタ Q_1 と Q_4 のオフ時には電源コンデンサの電圧 V_c と誘起電圧 V_{ax} の方向が相反するので、 $V_c > V_{ax}$ の関係がないと補助巻線電流 I_{ax} を減少させることができず、制御不能に陥る。同様に、(b)図の負荷電流の急減時においても補助巻線の誘起電圧 V_{ax} の方向が反転するのみで、同じことが言える。すなわち、整流特

図5 整流特性補償装置の動作説明図

Fig. 5. Schematic diagram of improving equipment of commutation quality.

図 6 整流特性補償装置の等価回路

Fig. 6. Equivalent circuit of improving equipment of commutation quality.

性補償装置の設計にあたっては、直流機的全運転領域において電源コンデンサの電圧 $V_c > \text{誘起電圧 } V_{ax}$ の関係となるように、電源コンデンサの電圧および補助巻線の巻線 n_{ax} を決定する必要がある。

(4.2) 過渡特性の計算方法 負荷電流の急増および急減時における補助巻線電流と電源コンデンサの電圧を算出する。図 6 に直流機と整流特性補償装置の等価回路を示し、補極巻線と補助巻線の相互インダクタンス M を含む S 領域の回路で表した。直流機側は一次側として補極巻線のみを考え、主スイッチ SW_1 を閉じて直流機を駆動する。整流特性補償装置側は二次側として補助巻線と電源コンデンサ（全波整流回路から電源コンデンサへの充電電流を無視する）とを考え、スイッチ SW_2 を閉じて電源コンデンサから補助巻線に電流を供給する。これより、初期電流を補極巻線が I_M 、補助巻線が I_{ax} とし、スイッチ SW_1 および SW_2 がオン時の回路方程式を求めると次式となる。

$$\frac{E}{S} + L_{1P}I_M - MI_{ax} = (R_1 + SL_{1P})i_M(S) - SMi_{ax}(S) \quad \dots (1)$$

$$\frac{V_c}{S} + L_{ax}I_{ax} - MI_M = \left(R_{ax} + SL_{ax} + \frac{1}{SC}\right)i_{ax}(S) - SMi_M(S) \quad \dots (2)$$

ここで、 E : 直流機の電源電圧、 L_{1P} , L_{ax} : 補極および補助巻線の自己インダクタンス、 R_1 , R_{ax} : 直流機側および補助巻線の抵抗、 V_c : 電源コンデンサの電圧、 C : 電源コンデンサの静電容量、 i_M , i_{ax} : 補極および補助巻線電流の瞬時値

(2)式を用いて補助巻線電流 $i_{ax}(S)$ を求めるには、負荷電流 $i_M(S)$ が必要となる。そこで、簡単化を行うため、図 7 に示すように負荷電流の変化を仮定した。

(1) 負荷電流の急増時 図 7 (a) に示す負荷電流 $i_M(S)$ は次式となる。

$$i_M(S) = \frac{I_M}{t_1 S^2} \quad \dots (3)$$

(a) 負荷電流の急増時

(b) 負荷電流の急減時

図 7 負荷電流の変化

Fig. 7. Variation of armature current.

(3)式を(2)式に代入し、初期電流を零として $i_{ax}(S)$ について整理し、逆ラプラス変換することにより、次式の補助巻線電流 i_{ax} が得られる。

$$i_{ax} = \frac{V_c + M(I_M/t_1)}{L_{ax}\omega} e^{-\alpha t} \sin \omega t \quad \dots (4)$$

ここで、

$$\alpha = \frac{R_{ax}}{2L_{ax}}, \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{L_{ax}C} - \alpha^2}$$

(2) 負荷電流の急減時 図 7 (b) に示す負荷電流 $i_M(S)$ は次式となる。

$$i_M(S) = \frac{I_M}{S} - \frac{I_M}{t_1 S^2} \quad \dots (5)$$

(5)式を(2)式に代入し、 $i_{ax}(S)$ について整理し、逆ラプラス変換することにより、次式の補助巻線電流 i_{ax} が得られる。

$$i_{ax} = \left[\frac{V_c - M(I_M/t_1)}{L_{ax}\omega} \sin \omega t + I_{ax} \left(\cos \omega t - \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t \right) \right] e^{-\alpha t} \quad \dots (6)$$

次に、過渡運転時において補助巻線の誘起電圧が電源コンデンサの電圧より大きくなると、補助巻線側から電源コンデンサへの充電電流が流れ、電源コンデンサの電圧が上昇する。このときの電源コンデンサの電圧 $V_{cx}(S)$ は次式で表せる。

$$V_{cx}(S) = \frac{V_c}{S} - \frac{1}{SC} i_{ax}(S) \quad \dots (7)$$

(7)式に(6)式の $i_{ax}(S)$ を代入して逆ラプラス変換することにより、次式の電源コンデンサの電圧 V_{cx} が得られる。

$$V_{cx} = V_c - \left(V_c - M \frac{I_M}{t_1} \right) \left[\left(1 - \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t + \cos \omega t \right) e^{-\alpha t} - \frac{I_{ax}}{\omega C} e^{-\alpha t} \sin \omega t \right] \quad \dots (8)$$

表 1 直流機と整流特性補償装置の仕様
Table 1. Specifications of DC machine and improving equipment of commutation quality.

直流電動機		整流特性補償装置	
容量 (kW)	2,000	容量 (kVA)	10.5
電圧 (V)	1,000	電圧 (V)	540
電流 (A)	2,180	電流 (A)	45
回転速度 (rpm)	350/900	寸法 (mm)	800×700×2,450
極数	6		(2台収納)

図 8 整流特性補償装置の外観写真

Fig. 8. Photograph of improving equipment of commutation quality.

5. 供試機の仕様と整流特性補償装置の試作結果

供試機として用いた 2,000 kW 直流電動機と今回試作した整流特性補償装置の仕様を表 1 に、整流補償装置の外観写真を図 8 に示す。表 1 より、整流特性補償装置の容量を 10.5 kVA とし、電源電圧 540 V、電流 45 A を定格とした。なお、図 8 に示す盤内には整流特性補償装置を 2 台収納できる構成としている。

6. 試験結果

整流特性補償装置の機能を確認するため、整流特性補償装置と補助巻線の代わりの R, L 負荷および電動機とを組合せた場合の定常運転特性、過渡運転特性について検討した。

〈6・1〉 定常運転特性

(1) R, L 負荷と整流特性補償装置との組合せ特性 図 9 に負荷電流と回転速度のモデル信号に対する整流特性補償装置の動作結果を示す。ここで、モデル信号は図中に示す大きさに回転速度 900 rpm、負荷電流 300% を想定した。(a) 図の負荷電流のモデル信

図 9 モデル信号に対する整流特性補償装置の動作結果

Fig. 9. The control results of improving equipment of commutation quality by model signal.

図 10 補助巻線電流のステップ応答

Fig. 10. Step responses of auxiliary coil current.

号を変化させた場合は回転速度を一定としているので、補助巻線電流の方向と大きさが負荷電流に対応している。これに対し、(b) 図の回転速度のモデル信号を変化させた場合は負荷電流を一定としているので、補助巻線電流の方向は変わらず、大きさのみが回転速度に比例している。これより、本整流特性補償装置は四象限運転に対応できることが確認できた。

図 10 に負荷電流のモデル信号に対する補助巻線電流のステップ応答を示し、インダクタンス L の値を 57 および 114 mH とした場合について測定した。同図より、ステップ指令が入ると電源電圧（電源コンデンサの電圧）が R, L 負荷に印加され、補助巻線電流が指令値に達した時点で PWM 制御が行われる。また、補助巻線電流が最大値に達するまでの時間は L の値に比例している。これより、補助巻線電流が負荷電流の変化に追従できるか否かは、補助巻線の抵抗、インダクタンスの値と電源電圧との兼ね合いで左右される。

(2) 電動機と整流特性補償装置との組合せ特性

図 11 は回転速度 900 rpm において、負荷電流を

図 11 負荷電流を変化させた場合の整流補償有無に対するオシログラム

Fig. 11. Oscillograms of with and without commutation compensating by armature current variation.

図 12 回転速度を変化したときの整流補償有無に対するオシログラム

Fig. 12. Oscillograms of with and without commutation compensating by armature speed variation.

25~100% までゆっくり変化させたときの整流補償有無に対するオシログラムを示す。(b)図の整流補償なしの場合は、負荷電流の増加と共に無火花帯位置が減励磁側へ移動して負荷軸よりはずれるように設定しているため、ブラシ後端電圧（主ブラシの後端部に検出ブラシを設けて検出）が負荷電流 100% で $\ominus 3.8\text{V}$ と火花発生限界電圧（通常 $\pm 2\sim 3\text{V}$ ）より大きくなる。これに対し、(a)図の整流補償ありの場合は負荷電流の変化に応じて補助巻線電流が流れるので、ブラシ後端電圧が火花発生限界電圧の範囲内の $\pm 1.4\text{V}$ に収まり、無火花運転化が図れた。

図 12 は負荷電流 100% において、回転速度を 350~900 rpm までゆっくり変化させたときの整流補償有無に対するオシログラムを示す。

(b)図の整流補償なしの場合は、回転速度の増加と共に無火花帯位置が減励磁側へ移動して負荷軸より外れるので、ブラシ後端電圧が回転速度 900 rpm で $\ominus 3.3\text{V}$ と大きくなる。これに対し、(a)図の整流補償

図 13 負荷電流を急減させた場合の補助巻線電流の変化（その 1）

Fig. 13. Responses of auxiliary coil current by armature current variation (No. 1).

ありの場合は回転速度の変化に応じて補助巻線電流が流れるので、ブラシ後端電圧が $\pm 1\text{V}$ 以内に収まり、無火花運転化が図れた。

これより、整流特性補償装置は定常運転に対しては良好な整流補償を行えることが確認できた。

〈6・2〉 過渡運転特性 整流特性補償装置は負荷電流の急増および急減時に対応して動作するが、ここでは負荷電流の急減時の場合について検討した。

図 13 は回転速度を 400 rpm に設定して、負荷電流を急減させた場合の補助巻線電流の変化を示す。同図より、負荷電流を電流変化率 220, 250 kA/s で変化させた場合は、電源電圧 V_e の 600 V に対して補助巻線の誘起電圧 V_{ax} が約 500 V となり、 $V_e > V_{ax}$ の条件を満足し、補助巻線電流を負荷電流の変化に追従させて制御することができた。このとき、目視でブラシからの火花発生がないことを確認した。これより、整流特性補償装置は定常運転はもとより過渡運転時に対しても良好な整流補償を行えることが確認できた。

なお、 $V_e > V_{ax}$ の条件を満足しない場合についても実験を行い、図 14 に示すように負荷電流を電流変化率 333 kA/s で変化させた。この結果、電源電圧 600 V に対して補助巻線の誘起電圧が約 650 V になって $V_e > V_{ax}$ の条件を満足しなくなり、補助巻線電流に制御不能領域が現れ、補助巻線電流の方向が反転する結果となった。このとき、目視でブラシからの火花発生を確認した。これより、整流特性補償装置の設計に際しては、電動機運転中における補助巻線の誘起電圧が電源電圧（電源コンデンサの電圧）を越えることがないように、整流特性補償装置および補助巻線の巻数などの最適設計を行う必要がある。

図 14 負荷電流を急減させた場合の補助巻線電流の変化 (その 2)

Fig. 14. Response of auxiliary coil current by armature current variation (No. 2).

7. 実測値と計算値の比較

図 15 は図 14 に示した過渡運転時の電源コンデンサの電圧および補助巻線電流の実測値と、(6), (8)式を用いて求めた計算値とを比較して示す。(a)図の負荷電流を図中に示すように、①点の 2,100 A から零まで 6.3 ms で変化する (電流変化率 333 kA/s) と仮定した。(b)図の電源コンデンサの電圧および(c)図の補助巻線電流の計算値は、補助巻線電流が負側から零になった時点②から最大になった時点③まで求め

図 15 電源コンデンサの電圧および補助巻線電流の実測値と計算値の比較

Fig. 15. Experiment and calculation value of condenser voltage and auxiliary coil current.

た。これより、計算値は実測値に対し、電源コンデンサの電圧についてはよく一致しているが、補助巻線の電流についてはその最大値の時点③で約 2 倍大きい結果となった。この原因は、負荷電流の電流変化率が一定でないために、補助巻線の誘起電圧 V_{ax} が変化しているのに対し、計算では誘起電圧 V_{ax} を最大値一定と仮定しているためと考える。なお、本計算方法は過渡運転時における電源コンデンサの電圧、補助巻線の電流変化を概略求めることができるので、回路定数の設計検討に有効と考える。

以上の結果より、本整流特性補償装置は四象限運転に対応して定常、過渡運転時とも良好に動作することが確認できた。

本整流特性補償装置は十分な信頼性評価を行って 1,650 kW 機 (366/1,100 rpm) を対象に製品化し、現在良好な整流状態で運転されている。

8. む す び

直流機の回転数に対する無火花帯移動現象を補償する整流特性補償装置を試作し、2,000 kW 機との組合せ試験を行い、次の結果を得た。

- (1) 四象限運転に対応できる整流特性補償装置の回路構成と制御方法を明らかにした。
- (2) 過渡運転時における補助巻線電流と電源コンデンサの電圧の算出方法を示した。
- (3) 整流特性補償装置は定常、過渡運転時とも良好に整流補償が行えることを確認した。

最後に、本研究の遂行にあたり、御指導、御協力いただいた日立製作所日立工場 古山部長、清水主任技師、江藤主任技師、丸井部員、同大みか工場 竹村部長、同日立研究所 木脇部長、高橋主管研究員の各位に対し、深く謝意を表します。

(昭和 62 年 9 月 10 日受付、同 63 年 2 月 29 日再受付)

文 献

- (1) 田原、他：「直流機の新構成電機子」、電学論 B, 102, 387 (昭 57-6)
- (2) 田原、他：「新構成電機子巻線の大形直流機への適用検討」、同上 D, 107, 255 (昭 62-2)
- (3) 石川、他：「無火花帯移動現象とその補償方式」、日立評論, 51, 1 (昭 44-10)
- (4) 小原木、他：「直流機の整流制御」、電学論 B, 104, 33 (昭 59-7)
- (5) 田原、他：「直流機の火花検出法の検討」、電気学会回転機研究, RM-85-29 (昭 60-7)
- (6) 小原木、他：「直流機の整流補償装置」、同上, RM-86-77 (昭 61-7)