



Title	直流機の無火花帯の一解析法
Author(s)	松島, 由太郎; Matsushima, Yoshitaro; 藤原, 一 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 95, 31-38
Issue Date	1979-08-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41578
Type	departmental bulletin paper
File Information	95_31-38.pdf



直流機の無火花帯の一解析法

松島由太郎* 藤原 一**

(昭和54年3月31日受理)

An Analytic Method of the No Spark Zone of DC Machines

Yoshitaro MATSUSHIMA Hajime FUJIWARA

(Received March 31, 1979)

Abstract

The no spark zone appreciating the commutation performance of D-C machines is calculated by the numerical method. An analytical method of the no spark zone is proposed in this paper.

In this analytical method, the no spark zone can be analyzed by the use of the linear commutation conditions. The effective inductance for the commutation coil inductance is then used in the commutation equations. The effective inductance is calculated through Richter's calculating formula.

The validity of the proposed analytical method of the no spark zone is confirmed by running a comparison between the calculated values and the tested values.

The features of this analytical method are summarized as follows:

- (1) The theory of the no spark zone is analytically developed in the case of β (brush covering number) > 1 .
- (2) The calculating procedure deciding the no spark zone can be simplified in this method.
- (3) The characteristics of the brush contact voltage vs. current are thoroughly considered in the theory.

1. ま え が き

直流機は可変速回転機として広く産業用に用いられ、その制御性能は極めて高い。直流機の最大の弱点とされる整流子と電気ブラシは、外部電気回路との電力の受授を行うが、この際、電機子巻線電流を高速、かつ、短時間に極性を反転させる。この時のスイッチングを含む電気磁気現象を整流現象という。

近年電子計算機の発達に伴い、直流機の整流問題は、整流方程式の数値計算からの解析^{1~9)}が可能となった。実機における整流方程式は、非線形多元微分方程式となり、さらに短絡コイルのスイッチングの際、特異点をもつことから、数値計算結果に多大な誤差を含むことが報告⁸⁾されている。この為、数値計算結果から得られる無火花帯にも少なからぬ影響が現れるものと思われる。

本論文では、ブラシ被ふく数が1の場合のみ求められていた図解による無火花帯理論^{10),11),12)}

* 電気工学専攻 博士後期課程

** 電気工学科 電気機器学講座

を、整流コイルインダクタンスとして、平均リアクタンス電圧の算式¹³⁾より求められるインダクタンスを用いることから、ブラシ被ふく数が任意の場合に拡張し検討した。

2. 整流方程式

本解析法を実行するに当たり、次のような仮定を設ける。

- (1) 短絡コイルインダクタンスは整流期間中一定であり、相互誘導を考慮した実効インダクタンス値を用いる。
- (2) 短絡コイル抵抗、ライザ抵抗は無視する。
- (3) 整流起電力は整流期間中一定とする。
- (4) ブラシは常に全面接触を行うものとする。

以上の仮定のもとに整流回路図を示すと第1図(a), (b)になる。(a)はブラシが N 個のコイルを短絡している状態であり、(b)は $N-1$ 個のコイルを短絡している状態を表わす。本解析法は短絡コイルのスウィング現象を含む(a)の整流回路より無火花条件式および無火花帯を求めるものである。よって、以後、整流方程式は第1図(a)より導いた式を用いる。

第1図(a)の電圧平衡方程式は(1)式となる。

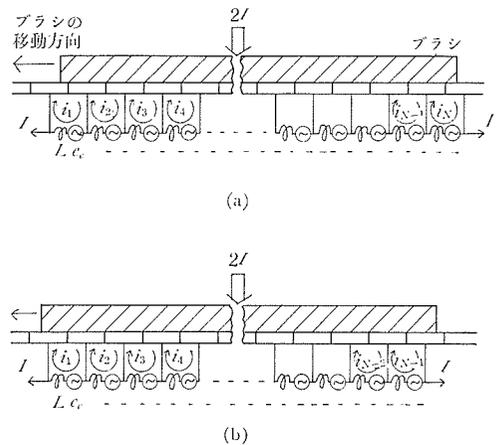
$$\left. \begin{aligned} L \frac{di_1}{dt} + v_2 - v_1 + e_c &= 0 \\ \dots\dots\dots \\ L \frac{di_j}{dt} + v_{j+1} - v_j + e_c &= 0 \\ \dots\dots\dots \\ L \frac{di_N}{dt} + v_{N+1} - v_N + e_c &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

- ただし、 L : 短絡コイル実効インダクタンス
 i_j : 第 j 番目の短絡コイル電流
 t : 第1番目のコイルが短絡を開始してからの時間
 v_j : ブラシ接触電圧
 e_c : 整流起電力

ここで、ブラシ接触電圧 v_j はブラシ接触電圧特性から次のように表現される⁹⁾。

$$v_j = (2I_F)^{1-1/m} R_b \left(\frac{I}{I_F} \right)^{-(n-m)/mn} \left(\frac{\beta i_{Rj}}{\theta_j} \right)^{1/m} \quad (2)$$

- ただし、 I_F : 定格電機子電流
 I : 電機子電流
 α : 基準化電機子電流 (I/I_F)
 R_b : 定格負荷時ブラシ全面接触抵抗
 β : ブラシ被ふく数 (T_c/T)
 T_c : 整流子片周期
 T : 整流周期



第1図 整流回路

(9) 式で、 y は基準化整流起電力、 Y は第 $N-1$ 番目のブラシ整流子片間基準化電圧と基準化整流起電力の差である。

第 N 番目のコイルが開離するとき、ブラシ出口電圧がある一定電圧を越えると火花を発生する¹¹⁾。ここで、ある一定電圧はブラシ火花電圧（電気黒鉛ブラシでは約 3 V）と称されている。このブラシ火花電圧を E_s で表わし、(6) 式を導出したときの手順により基準化を行えば (10) 式となる。

$$V_s = \frac{E_s T_c}{L I_F} \quad (10)$$

よって、ブラシ出口基準化電圧 V_{N0} が V_s を越えない範囲がブラシ火花電圧無火花条件となることから (11) 式を得る。

$$-V_s \leq V_{N0} \leq V_s \quad (11)$$

(11) 式がブラシ火花電圧無火花条件式である。

また、 $V_{N0} = (2/\beta)^{1-\frac{1}{m}} \rho \alpha^{-(n-m)/mn} G_{N0}^{1/m}$ と $V_{N0} = G_{N0} + Y$ が解をもつ限界条件は、ブラシ電流密度有限帯火花条件といい、その限界基準化電圧 V_{NZ} は図式的に $V_{N0} = (2/\beta)^{1-\frac{1}{m}} \rho \alpha^{-(n-m)/mn} \times G_{N0}^{1/m}$ と $V_{N0} = G_{N0} + Y$ が接する時の V_{N0} として求められる。これを計算により求める。(9) 式を微分して

$$G_{NZ} = (\lambda/m)^{m/(m-1)} \quad (12)$$

$$\text{ただし、} \lambda = \left(\frac{2}{\beta}\right)^{1-\frac{1}{m}} \rho \alpha^{-(m-n)/mn}$$

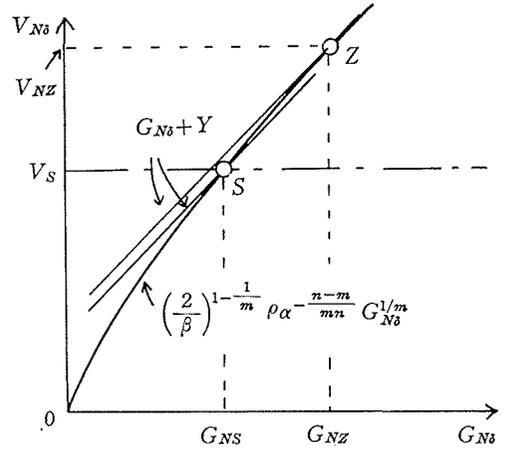
を得る。(12) 式を (9) 式に代入して (13) 式を得る。

$$V_{NZ} = \lambda \left(\frac{\lambda}{m}\right)^{1/(m-1)} \quad (13)$$

よって、ブラシ電流密度有限帯無火花条件式は (14) 式となる。

$$-V_{NZ} \leq V_{N0} \leq V_{NZ} \quad (14)$$

(11) 式の V_s と (14) 式の V_{NZ} の相異は、 V_s が一定値であるのに対して、 V_{NZ} は λ 、すなわち α の関数となる事である。第 2 図は V_s 、 V_{NZ} 、 G_{NS} 、 G_{NZ} の関係を表わす図である。



第 2 図 V_s 、 V_{NZ} 、 G_{NS} 、 G_{NZ} の図解

4. 無火花帯

無火花帯を図解より求め理論は、ブラシ被ふく数 $\beta=1$ の場合には求められていた^{10),11),12)}。この場合、短絡コイル数は 1 個であり、短絡コイル電流は短絡コイルが開離するとき、 $-\alpha$ (基準化値) になるという条件から無火花帯が計算される。しかし、本解析法では、 $\beta>1$ に対して直線整流の条件を基にして、解析を可能にしている。以下、その手順を述べる。

直線整流のとき、(6) 式の各短絡コイル電流の微係数 $dx_j/d\tau$ ($j=1, 2, \dots, N$) は総て等しくなる。よって、これらの事から (15) 式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} G_{N_0} &= \frac{2\alpha}{\beta} \\ \left\{ (x_{N-1} - x_N)^{1/m} - \left(\frac{\alpha + x_N}{\delta - \tau} \right)^{1/m} \right\}_{\tau \rightarrow \delta} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

(15) 式を (7) 式に代入して

$$\frac{2\alpha}{\beta} = \frac{2\rho}{\beta} \phi_{CL} \quad (16)$$

を得る。ここで

$$y_L = \frac{2\rho\phi_{CL}}{\beta} = \frac{2\alpha}{\beta} \quad (17)$$

とおく。(17) 式は直線整流時の基準化整流起電力を表わす。さらに直線整流の時、(9) 式中の V_{N_0} 接片 Y_L は (18) 式となる。

$$Y_L = \frac{2}{\beta} \rho \alpha^{1/n} - \frac{2\alpha}{\beta} \quad (18)$$

(18) 式より Y_L は α のみの関数となっている。

次に無火花帯中心線を求める。ブラシ出口基準化電圧

$$V_{N_0} = 0 \quad (19)$$

が無火花帯中心線を表わす条件式となる。よって (9) 式より

$$\left. \begin{aligned} G_{N_0} &= 0 \\ Y &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

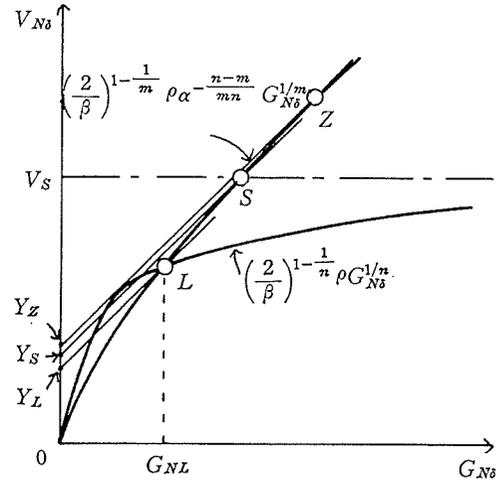
を得る。このときの Y を Y_0 とおくと、(20) 式より Y_0 は総ての G_{N_0} に対して零である。これらの事から $Y_L - Y_0$ は (21) 式となる。

$$Y_L - Y_0 = \frac{2}{\beta} \rho \alpha^{1/n} - \frac{2\alpha}{\beta} \quad (21)$$

無火花帯は $y - \alpha$ 平面上に描かれる。 V_{N_0} , G_{N_0} , Y , y は原整流方程式 (4) 式より出発して基準化された (9) 式中に表われてくるが、総て同一次元に統一されている。従って、 $Y_L - Y_0$ は $V_{N_0} - G_{N_0}$ 図上で、直線整流時ブラシ出口基準化電圧と無火花帯中心線整流時ブラシ出口基準化電圧の差を表わす。よって、これらを $y - \alpha$ 平面図上へ移すと、 $y_L = 2\alpha/\beta$ が直線整流時の基準化整流起電力であるから、 $y_L + Y_L$ は $y - \alpha$ 平面図上で無火花帯中心線基準化整流起電力を表わす事になる。これを (22) で表わす。

$$y_0 = y_L + Y_L = \frac{2}{\beta} \rho \alpha^{1/n} \quad (22)$$

総合無火花帯はブラシ火花電圧無火花帯およびブラシ電流密度有限帯の合成として求められる⁹⁾。まず (11) 式よりブラシ火花電圧無火花帯を求める。ブラシ火花電圧無火花帯幅は、(9) 式において $V_{N_0} = V_S$ となる Y の値 Y_S である。故に



第3図 Y_S , Y_Z , Y_L の図解

$$V_S = \left(\frac{2}{\beta}\right)^{1-\frac{1}{m}} \rho \alpha^{-(n-m)/mn} G_{NS}^{1/m}$$

より

$$G_{NS} = \left(\frac{V_S}{\lambda}\right)^m \quad (23)$$

を得る。(23)式を(9)式右辺に代入して

$$Y_S = V_S - \left(\frac{V_S}{\lambda}\right)^m \quad (24)$$

を得る。よって、ブラシ火花電圧無火花帯は(22)式、(24)式から

$$\begin{aligned} y_s &= y_0 \pm Y_S \\ &= \frac{2}{\beta} \rho \alpha^{1/n} \pm \left\{ V_S - \left(\frac{V_S}{\lambda}\right)^m \right\} \end{aligned} \quad (25)$$

で与えられる

次にブラシ電流密度有限帯を求める。ブラシ電流密度有限帯幅は、(14)式において $V_{Ns} = V_{NZ}$ となる Y の値 Y_Z である。故に

$$V_{NZ} = \left(\frac{2}{\beta}\right)^{1-\frac{1}{m}} \rho \alpha^{-(n-m)/mn} G_{NZ}^{1/m}$$

より

$$G_{NZ} = \left(\frac{V_{NZ}}{\lambda}\right)^m \quad (25)$$

(25)式に(13)式を代入して

$$G_{NZ} = \left(\frac{\lambda}{m}\right)^{m/(m-1)} \quad (26)$$

を得る。(26)式を(9)式の右辺に代入して

$$Y_Z = \lambda \left(\frac{\lambda}{m}\right)^{1/(m-1)} \left(\frac{m-1}{m}\right) \quad (27)$$

を得る。よって、ブラシ電流密度有限帯は(22)式、(27)式から

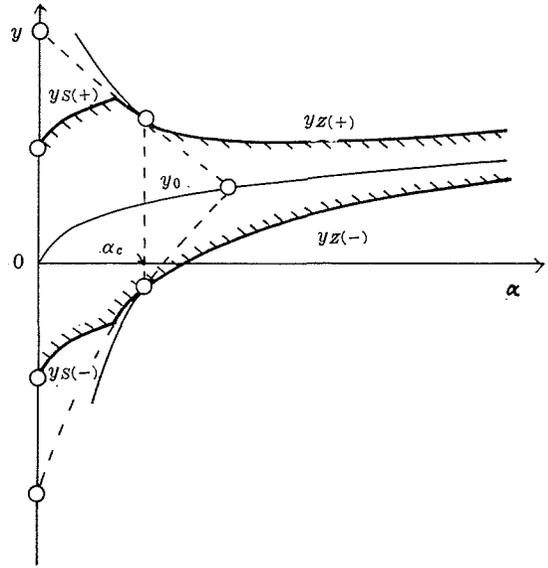
$$y_z = y_0 \pm Y_Z = \frac{2}{\beta} \rho \alpha^{1/n} \pm \lambda \left(\frac{m}{\lambda}\right)^{1/(m-1)} \left(\frac{m-1}{m}\right) \quad (28)$$

で与えられる。

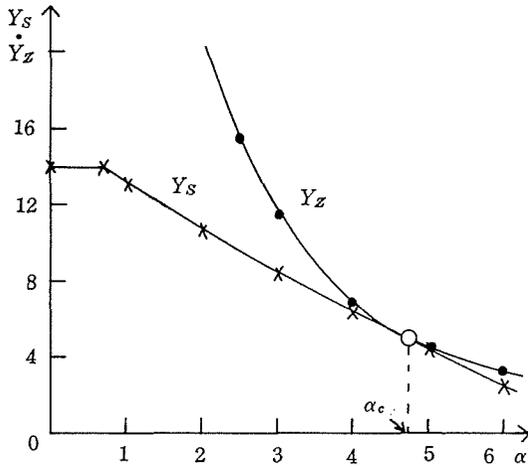
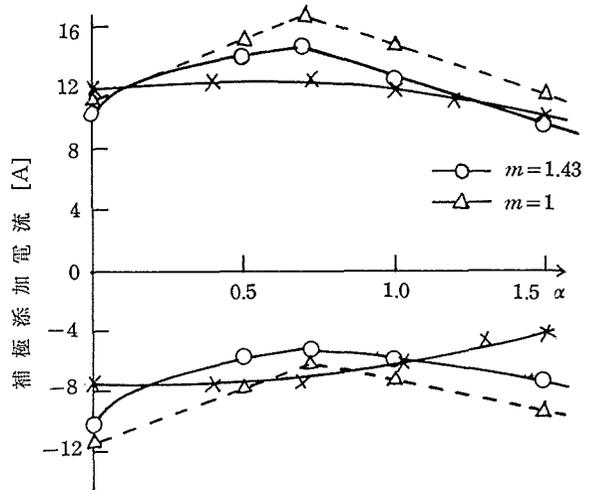
第3図に Y_S , Y_Z , Y_L の図解を示す。また、(25)式、(28)式の形状図を第4図に示す。第4図では便宜上、過整流限界線を y に添字(+), 不足整流限界線を y に(-)を付して表わし、総合無火花帯はハッチングして表わされている。総合無火花帯は前述したように、ブラシ火花電圧無火花帯およびブラシ電流密度有限帯の合成で求められるが、 $Y_S = Y_Z$ となる $\alpha = \alpha_c$ を境界として、 $\alpha \leq \alpha_c$ ではブラシ火花電圧無火花帯、 $\alpha \geq \alpha_c$ ではブラシ電流密度有限帯をとる⁹⁾。

5. 実測値と計算値の比較

無火花帯の実測値と計算値を第6図に示す。供試機は定格出力3[kW], 定格電機子電流



第4図 無火花帯形状図

第5図 Y_s , Y_z と α_c の決定

第6図 無火花帯実測値および計算値

15 [A], ブラシ被ふく数 2.5, 実効インダクタンス 6.98 [μ H], 回転数 1500 [rpm] ブラシ全面接触抵抗 0.0357 [Ω] である。

第5図に Y_s , Y_z と α_c の計算値を示す。計算では $\alpha_c = 4.75$ となるので、実測との比較より、無火花帯は、ブラシ火花電圧無火花帯のみ計算すればよい。第6図で×印実線が実測値を表わすが、電機子電流は使用状態を考慮し、50 [%] 増電機子電流まで測定した。また、ブラシ接触電圧特性が非線形の場合の計算値を○印実線、線形の場合の計算値を△印破線で示す。ブラシ接触電圧特性が非線形の場合と線形の場合では、線形の場合の方が無火花帯は少し広がる。実測値と計算値の比較は、ブラシ接触電圧特性が非線形の場合不足整流の過負荷時を除けば、かなりよい一致をみている。

6. む す び

整流条件の近似を行い、整流性能を表わす無火花帯の $\beta \geq 1$ に対する解析法を述べた。それから次の結果を得た。

- (1) 従来の $\beta=1$ の無火花帯図式解法を $\beta \geq 1$ まで拡張できた。
- (2) モデル機に対して無火花帯は解析解である。
- (3) ブラシ接触電圧特性は非線形のまま解析に適用できた。

等である。

当解析で今後問題として残る点は実効インダクタンスの決定法である。別の機械についても計算し検討したい。

終りに、当論文を書くに当り御討論下さった本学一般電気工学講座内藤正本教授、常に御指導、御助言を頂いている室蘭工大電気工学科松田敏彦教授、当講座の皆様に深謝致します。

参 考 文 献

- 1) T. M. Linville, et al.: Trans. Amer Inst Elect. Engrs, 71, 1, 326 (1952).
- 2) J. R. M. Alger, et al.: 同上, 76, 8, 399 (1957).
- 3) M. Tarkanyi, et al.: Proc. Inst. Elect. Engrs, 109, 488 (1962).
- 4) 乙武: 東芝レビュー, 16, 1030 (昭37-8).

- 5) J. S. Ewig, et al.: IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-91, 1663 (1972).
- 6) 松田: 電学論誌, **94-B**, 10, 479 (昭 49-10).
- 7) 松田: 同上, **94-B**, 10, 487 (同上).
- 8) 森田, 他: 同上, **97-B**, 1, 31 (昭 52-1).
- 9) 松田, 他: 同上, **97-B**, 6, 34 (昭 52-6).
- 10) 安部: 電学誌, **60**, 2, 74 (昭 15-2).
- 11) 林: 同上, **68**, 8, 203 (昭 23-8).
- 12) 一木: 日立評論, **33**, 187 (昭 26-3).
- 13) R. Richter 著: 直流機原論, p. 24 (昭 38) コロナ社.