鹿児島大学工学部研究報告　第 47 号（2005）

PWM インバータ駆動ブラシレス DC モータのコモンモード等価回路による軸電圧およびベアリング電流の計算

飯盛　憲一*　　篠原　勝次*　　森上　敦史**

Calculation of Shaft Voltage and Bearing Current of Brushless DC Motor Driven by PWM Inverter

Kenichi IIMORI, Katsuji SHINOHARA, Atsushi MORIGAMI

This paper describes the calculated and measured waveforms of shaft voltage and bearing currents of the brushless DC motor driven by PWM inverter. At first, we discussed the current path of the bearing current when unloaded side bearing is conducting and load side bearing is not conducting. Next, we derive a common mode equivalent circuit, and calculate the shaft voltage and bearing current. Finally, to confirm the validity of the derived circuit, calculated waveforms are compared with measured waveforms.

Keywords : Brushless DC motor, shaft voltage, bearing current, common mode equivalent circuit

１．　まえがき

誘導電動機を PWM インバータで駆動する場合に発生するコモンモード電流による電磁妨害(EMI)やベアリング電流によるベアリング故障等について，高周波等価回路が提案され，その発生メカニズムと解析，および抑制法などが報告されている [1)~3)]。永久磁石を使用した同期電動機についても高周波等価回路をモデル化し，高周波振動電流について詳細な検討が行われているが，軸電圧およびベアリング電流については考慮されていない [4)]。

筆者らは先に PWM インバータ駆動時における誘導電動機の軸電圧およびベアリング電流が計算可能なコモンモード等価回路に関して報告した [3)]。ブラシレス DC モータにおいても軸電圧の発生原因はコモンモード電圧に起因するものであり，基本的には誘導電動機の場合と同じである。

2004 年 8 月 31 日受理

*　　電気電子工学科
**　　博士前期課程機械工学専攻

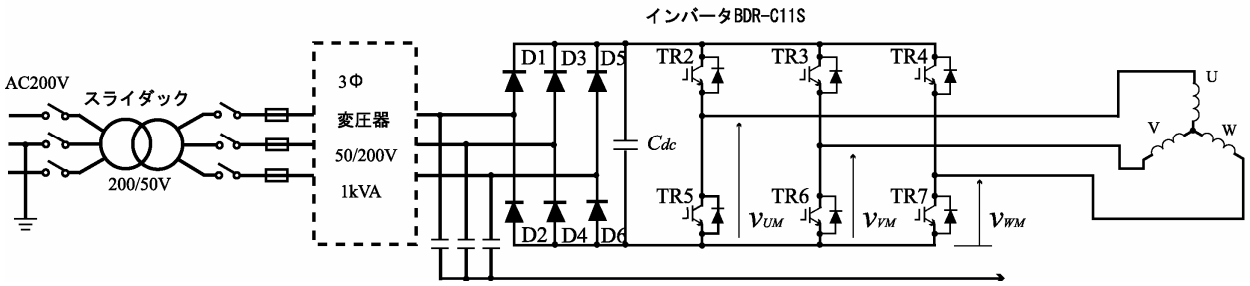
本論文では，まず，ブラシレス DC モータの軸電圧およびベアリング電流の測定値からベアリング電流が流れる経路を明らかにする。次に，ブラシレス DC モータのコモンモード等価回路をモデル化し，軸電圧およびベアリング電流について実測値と計算値を比較する。最後に，ブラシレス DC モータの永久磁石およびベアリングの静電容量を変化した場合に軸電圧の変化を計算により求める。

２．　軸電圧およびベアリング電流の測定

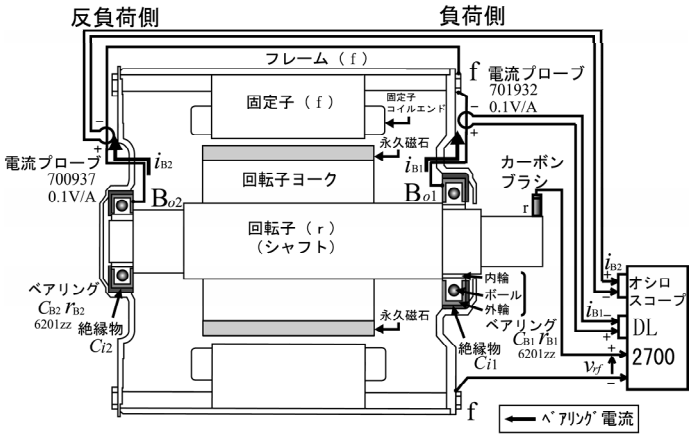
2.1　測定回路

図－1 に軸電圧およびベアリング電流の測定回路を示す。軸電圧 v_{rf} は，インバータ出力電圧の変化に対応して発生するコモンモード電圧 v_c に起因するため，各相のインバータ出力電圧と直流リンク部の負極間電圧 v_{UN}，v_{VN} および v_{WN} を軸電圧 v_{rf} と同時に測定している。このときコモンモード電圧 v_c は次式で表される。

$$v_c = \frac{v_{UN} + v_{VN} + v_{WN}}{3} \tag{1}$$



図－1　軸電圧およびベアリング電流の測定回路



図－2　DC ブラシレスモータにおける軸電圧および
ベアリング電流測定部の詳細

図－2はブラシレスDCモータにおける軸電圧およびベアリング電流測定部の詳細図である。ベアリング電流 i_{b1}，i_{b2} は，ベアリング外輪(B_{o1},B_{o2})とフレーム(f)の間に絶縁物(C_{i1},C_{i2})を入れ，この絶縁物を短絡したリード線を流れる電流を電流プローブで測定した。なお，ベアリング電流 i_{b1},i_{b2} は軸からフレームに流れる場合を正方向とした。軸電圧 v_{rf} の測定はオシロスコープ DL2700 用の標準プローブを使用し，ブラシレス DC モータのフレームと，軸に接触させたカーボンブラシとの間の電圧を測定した。測定時におけるブラシレス DC モータの回転数は 1350rpm である。

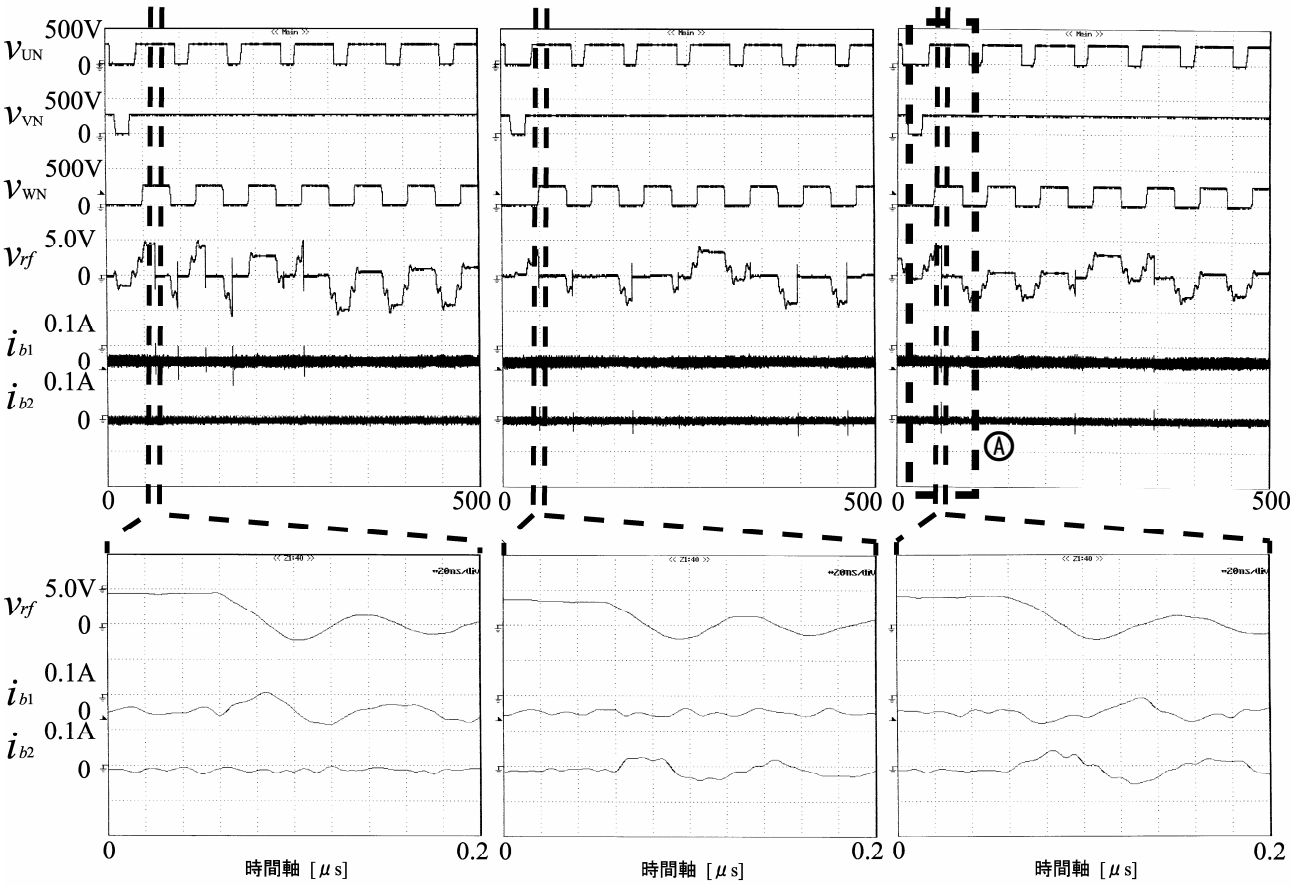
2.2　測定結果

図－3 は軸電圧およびベアリング電流の測定波形である。図－3(a)は，反負荷側ベアリングの B_{01} をフレームと絶縁した場合の波形である。したがって，この場合の軸電圧 v_{rf} の低下は負荷側ベアリングに起因するものであり，v_{rf}が正の電圧から 0V に落ちるときベアリング電流 i_{b1} が正方向に流れている。図－3(b)は，負荷側ベアリングの B_{o1} をフレームと絶縁した場合の波形である。この場合の軸電圧 v_{rf} の低下は反負荷側ベアリングに起因するものであり，v_{rf}が正の電圧から 0V に落ちるときベアリング電流 i_{b2} が正方向に流れている。

図－3(c)は負荷側および反負荷側ベアリング共に絶縁物をリード線で短絡し，ベアリング電流 i_{b1}，i_{b2} を同時に測定した場合の波形である。この場合の軸電圧 v_{rf} の低下は，負荷側または反負荷側ベアリングのうち低い電圧で導通状態になるベアリングで決まる。図－3(c)の場合は軸電圧 v_{rf} が正から 0V に落ちるとき反負荷側ベアリング電流 i_{b2} が正に流れていることから，反負荷側ベアリングが導通状態になったものと思われる。このとき負荷側ベアリング電流 i_{b1} は反負荷側ベアリング電流 i_{b2} と逆極性の電流が流れている。これは反負荷側ベアリングが導通状態になったことにより，負荷側ベアリングの静電容量により $i_{b1}=C_{b1}\cdot(-dv_{rf}\ /\ dt)$の電流が，軸→反負荷側ベアリング→フレーム→負荷側ベアリングの経路で流れたものと思われる。この場合，i_{b1} は C_{b1} の放電によるものであり，負荷側ベアリングを貫通することはないが，反負荷側ベアリングは導通状態であるため貫通して流れる。このことから，ベアリングの劣化が始まり，軸電圧が導通状態を起こすようになると，正常なベアリングの放電電流も劣化したベアリングを流れるため，ベアリングの劣化を加速することも考えられる。

図－3(a)の軸電圧が最初に 0V に落ちる箇所は v_{UN}, v_{VN} および v_{WN} が全て 282V になった後であり，軸電圧 v_{rf} が 3 段階上昇した後 0V まで落ちている。一方，図－3(b)の軸電圧が最初に 0V に落ちる箇所は v_{UN} と v_{VN} が 282V であり，軸電圧 v_{rf} が 2 段階上昇した後 0V まで落ちている。このことからも反負荷側ベアリングが負荷側ベアリングより低い電圧で導通しやすい状態であることが分かる。

３．　軸電圧およびベアリング電流の計算



(a) 反負荷側ベアリングとフレームが絶縁　(b) 負荷側ベアリングとフレームが絶縁　(c) 負荷側および反負荷側のベアリング電流を同時に測定

図－3　軸電圧およびベアリング電流の測定波形

3.1　ブラシレス DC モータのコモンモード等価回路

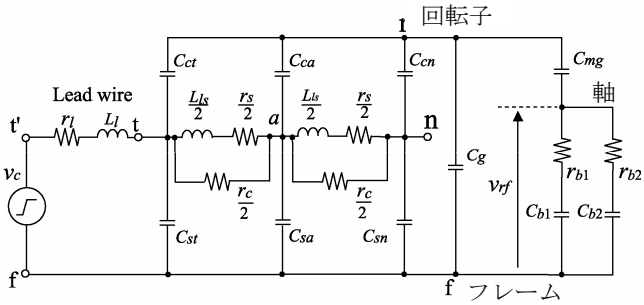
図－4 はブラシレス DC モータのコモンモード等価回路を集中定数を用いて示したものである。端子 t はブラシレス DC モータの入力端子 U，V，W を三線一括したものである。図－4 において，C_c はコイルエンドと回転子間，C_s は固定子巻線と固定子鉄心間，C_g はエアギャップ間，C_{mg} は永久磁石，C_{b1} および C_{b2} は負荷側および反負荷側ベアリングの静電容量を示す。また，L_{ls} は固定子巻線の漏れインダクタンス，R_s は固定子巻線抵抗，r_l および L_l はインバータから端子 t までの配線の抵抗およびインダクタンスをそれぞれ示している。r_c は t－f 間のインピーダンスの周波数特性での並列共振時の抵抗である [3]。コモンモード等価回路に印加するコモンモード電圧 v_c は(1)式により求める。なお，計算は PSIM を用いた。

3.2　コモンモード等価回路の定数測定 [3]

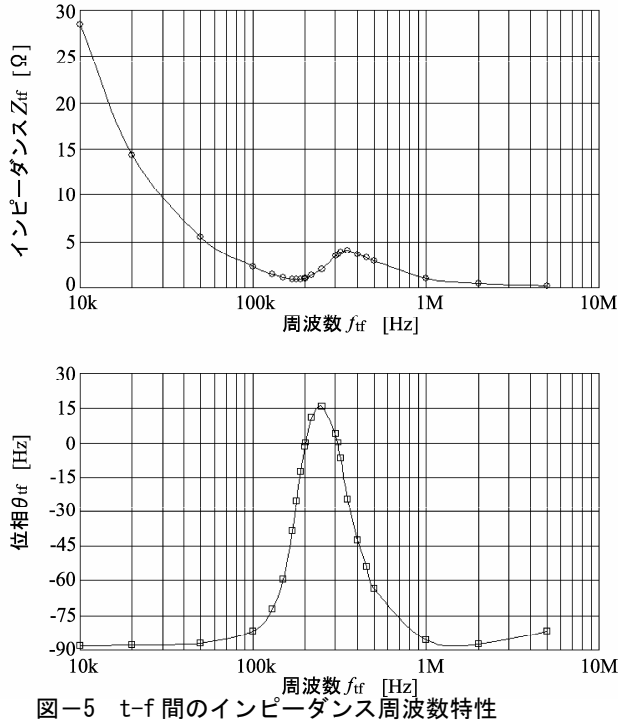
図－4 のコモンモード等価回路の各定数は，ブラシレス DC モータの入力端子 U，V，W を三線一括した端子 t と中性点から引き出してきた端子 n の間(t–n 間)，端子 t とフレーム間(t–f 間)のインピーダンス周波数特性をそれぞれ測定し，各定数を求めた。測定には LCR メータ(3532，測定周波数 42Hz～5MHz)を用いた。

図－5 に回転子を組み込んだ状態での t–f 間のインピーダンス周波数特性を示す。この測定ではモータは停止状態であり，したがってベアリングは導通状態である。図－5 において約 10kHz ではインピーダンスの位相は-90 度であり，t–f 間のインピーダンスは静電容量の特性を示している。この静電容量は，C_c (=C_{ct}＋C_{ca}＋C_{cn}) が C_g+C_{mg} に比べて非常に小さいため，C_c と C_s (=C_{st}+C_{sa}+C_{sn}) の和となる。

次に，回転子を取り除いて t–f 間のインピーダンス周波数特性を測定した場合の，10kHz における静電容量は C_s となる。これらの測定結果から C_s，C_c を



図－4　DC ブラシレスモータのコモンモード等価回路



図－5　t-f 間のインピーダンス周波数特性

求めることができる。同様にして文献 3)に示すコモンモード等価回路の定数測定方法により求めた各定数を表 1 に示す。なお，ブラシレス DC モータに使用しているベアリングは 6201zz であるが，ベアリング単体の静電容量が測定できなかったので 6004zz の静電容量値を用いた。

3.3　計算結果

図－6 は図－3(c)のⒶ区間に対応した計算波形である。コモンモード電圧 v_c は(1)式により，v_{UN}, v_{VN} および v_{WN} の立上がり立下がりに対応して階段状に変化している。軸電圧 v_{rf} の立上がりに発生している振動は r_s，L_{ls} および C_s によるものである。なお，v_{rf} を 0V に落とす時間は，図－3(c)のⒶ区間における v_{rf} が 0V に落ちる時間にあわせている。

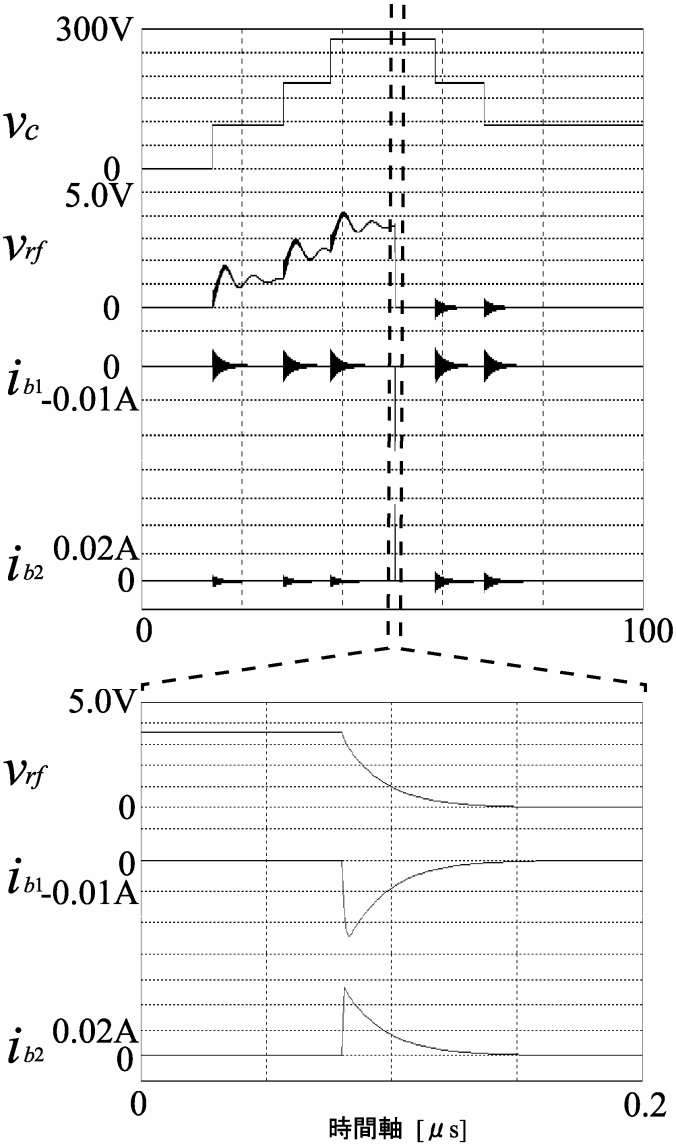
表－1　計算に用いた各部定数

	記号	定数名	定数値
各部定数	r_s	固定子巻線抵抗	5.21Ω
	L_{ls}	漏れインダクタンス	3.42mH
	C_{st}	コイル-固定子鉄心間 浮遊容量(入力側)	141pF
	C_{sa}	コイル-固定子鉄心間 浮遊容量(中間固定子巻線)	240.6pF
	C_{sn}	コイル-固定子鉄心間 浮遊容量(中性点側)	141pF
	C_{ct}	コイルエンド-回転子表面間 浮遊容量(入力側)	2.16pF
	C_{ca}	コイルエンド-回転子表面間 浮遊容量(中間固定子巻線)	3.68pF
	C_{cn}	コイルエンド-回転子表面間 浮遊容量(中性点側)	2.16pF
	C_g	エアギャップ浮遊容量	193.9pF
	C_{b1}	ベアリングの静電容量(負荷側)	130pF
	C_{b2}	ベアリングの静電容量(反負荷側)	130pF
	r_{b1}	ベアリングの抵抗(負荷側)	12.9Ω
	r_{b2}	ベアリングの抵抗(反負荷側)	12.9Ω
	C_{mg}	永久磁石の浮遊容量	316pF
	r_c	並列共振抵抗分	6150Ω
	r_l	配線部抵抗	0.01Ω
	L_l	配線部インダクタンス	0.7323uH

計算波形において，反負荷側ベアリングの軸電圧 v_{rf} を 0V に落としているためベアリング電流 i_{b2} が正方向に流れ，i_{b1} は負の方向に流れている。

v_{rf} が 0V に落ちる直前の v_{rf} の値は，実験値の 4.1V に対して計算値は 3.6V と計算値が低い値になっている。このとき i_{b1} および i_{b2} の実験値はそれぞれ－0.031A，0.056A であるが，計算値はそれぞれ－0.025A，0.05A でありベアリング電流についても計算値の方がわずかに小さい。また，i_{b1}，i_{b2} の実験波形は正・負に振動しているが，計算波形は振動していない。これは，図－4 のコモンモード等価回路において，ベアリング部の等価回路を抵抗と静電容量で表したが，実際にはインダクタンス分を含んでいるものと思われる。

図－7 は，コイルエンド－回転子間静電容量 C_c および永久磁石の静電容量 C_{mg} の値を変化した場合の軸電圧 v_{rf} の変化を示したものである。図－4 の等価回路から分かるように C_c を零(C_c を取り除く)にした場合は固定子巻線と回転子間の静電結合

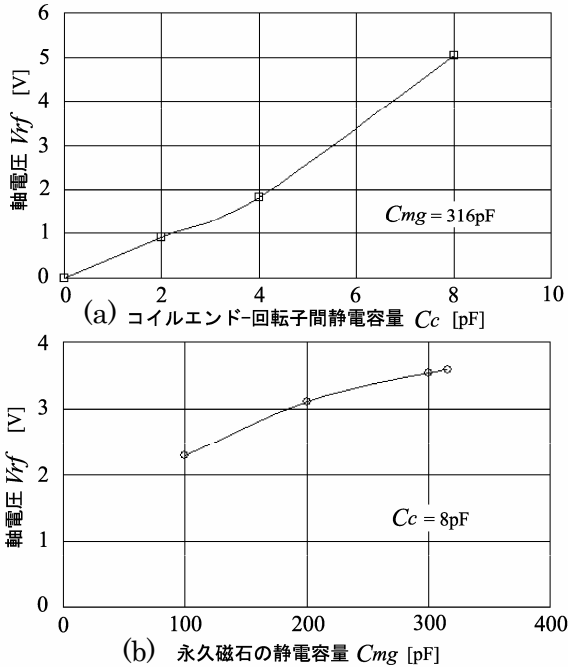


図－6　軸電圧およびベアリング電流の計算結果

がなくなるため軸電圧 v_{rf} は表れない。また，C_c の値を小さくすると軸電圧 v_{rf} も小さくなる。C_{mg} についても同様に静電容量が小さいほど C_{mg} が分担する電圧が増加し，軸電圧 v_{rf} は小さくなる。

ブラシレス DC モータにおいて，軸電圧 v_{rf} を低くするためには, コイルエンドと回転子間の静電結合を小さくする必要がある。さらに永久磁石部の静電容量を小さくすることにより軸電圧は低くなり，ベアリング油膜の絶縁破壊による電食も抑えられることが予測できる。

4．　まとめ



図－7　C_c，C_{mg} を変化した場合の軸電圧の変化

ブラシレス DC モータの軸電圧およびベアリング電流について，実験および計算を行った。結果を要約すると以下の通りである。

(1) ベアリングの劣化が始まり，軸電圧が導通状態を起こすようになると, 正常なベアリングの放電電流も劣化したベアリングを流れるため, ベアリングの劣化を加速することも考えられる。

(2) ブラシレス DC モータにおいて，軸電圧 v_{rf} を低くするためにはコイルエンド部と回転子間の静電結合を小さくする必要がある。さらに永久磁石部の静電容量を小さくすることにより軸電圧は低くなり, ベアリング油膜の絶縁破壊による電食も抑えられることが予測できる。

参考文献

1)　小笠原 悟, 藤田 英明, 赤木 泰文 : 電学論 D, 115，1，pp.77-83(1995)

2)　D.Busse, J.Erdman, R.J. Kerkman, D. Schlegel, and G. Skibinski: *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol.33, No.2, pp.577-584(1997)

3)　飯盛 憲一, 篠原 勝次, 愛甲 光徳 : 電学論 D, vol.125, No.5, pp.438-448(2005)

4)　佐藤 正一, 道木 慎二, 石田 宗秋 : 電学論 D, vol.124, No.5, pp.464-470(2004)