

電磁誘導を用いた PMSM の磁石温度検出

半場 諒* 日下 佳祐 (長岡技術科学大学)
北条 善久 (東洋電機製造)

Temperature Detection of Magnet in PMSM using Electromagnetic Induction

Ryo Hamba*, Keisuke Kusaka (Nagaoka University of Technology)

Yoshihisa Hojo (TOYO DENKI SEIZO K.K.)

This paper proposes a temperature detection method for magnets of PMSMs using electromagnetic induction and a thermistor. The magnet temperature is measured by the NTC thermistor, which is connected to the secondary side of a wireless power transfer system. The temperature change of the thermistor is detected through the change in the DC input power of the high-frequency power supply, which supplies power to the WPT system. The experimental results show that the proposed method detects the temperature of a stationary thermistor using DC input power. The estimation error is less than 11°C.

キーワード : 永久磁石同期電動機, 温度検出, 電磁誘導, 非接触電力伝送

(Permanent Magnet Synchronous Motor, Temperature Detection, Electromagnetic Induction, Wireless Power Transfer)

1. はじめに

永久磁石同期電動機 (以下, PMSM) は, 誘導電動機より高効率でトルク密度が高いことから, 電気自動車やハイブリッド自動車などの駆動用モータとして広く利用されている。PMSM に用いられる永久磁石は渦電流損により発熱⁽¹⁾, 減磁する。例えば PMSM に使用される代表的な永久磁石である NdFeB では, 温度 1°C の上昇につき残留磁束密度が約 0.1%減少する⁽²⁾。したがって, 永久磁石の発熱はトルク減少による性能低下の原因となる。また, さらなる発熱により不可逆減磁が起り, PMSM の故障を引き起こす可能性もある。このことから, 一般的には過負荷運転に対する連続運転時間を制限することで PMSM の保護が図られる。しかし, 実際の磁石温度は PMSM の周辺温度や過去の運転条件によって異なるため, 大幅にマージンを確保することとなる。以上のことから, PMSM の磁石温度の測定もしくは推定技術が求められる。

しかしながら, PMSM の磁石はロータに取り付けられているため, 直接の温度検出は困難である。温度センサとスリップリングを組み合わせることで回転中の磁石温度を測定することができるが, リングとブラシの接触を伴うため耐久性やメンテナンス性が低く, 信頼性に課題がある。また, 赤外線カメラはコストが高いため, 量産製品には不向きである。

そこで, 非接触で磁石温度を検出する技術として, 熱モデルを用いた手法⁽³⁾⁻⁽⁸⁾や高周波信号を注入する手法⁽²⁾⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾が

提案されている。熱モデルを用いた手法は, 放熱条件が変わると推定精度が低下する恐れがあり, 使用環境の変化に対応できないという問題がある。高周波信号を注入して磁石温度依存性がある高周波抵抗や高周波インダクタンスを推定する手法は, 推定温度が全磁石の温度に依存し, 個々の磁石の温度を推定することはできない。

本稿では, 磁界結合方式の非接触電力伝送 (以下, WPT) 回路とサーミスタの温度特性を用いて磁石温度を検出する手法⁽¹²⁾を提案する。提案法は, 固定部と回転部の接触がなく, 耐久性やメンテナンス性の問題が解決できる。実機実験により, WPT 回路の一次側に電力を供給する高周波電源の直流入力電力が二次側に負荷として接続されたサーミスタの温度に依存する特性を持つことを確認した。この特性を用いて, 直流入力電力からサーミスタの温度を推定することができたので報告する。

2. 温度検出装置

〈2・1〉 構造 Fig. 1 に提案装置の構成を示す。提案装置は固定部と回転部に分けられる。固定部は, 直流電源と高周波電源, 一次側コイルを含む送電回路と, 電力検出器から構成される。回転部は, 二次側コイルを含む受電回路とサーミスタから構成され, PMSM のロータとともに回転する。サーミスタは測温対象であるロータ内の永久磁石に取り付けられる。したがって, サーミスタを取り付けた磁石の温度のみが測定され, サーミスタを取り付けていない箇所の温度は測定に影響しない。一次側コイルと二次側コイルはシ

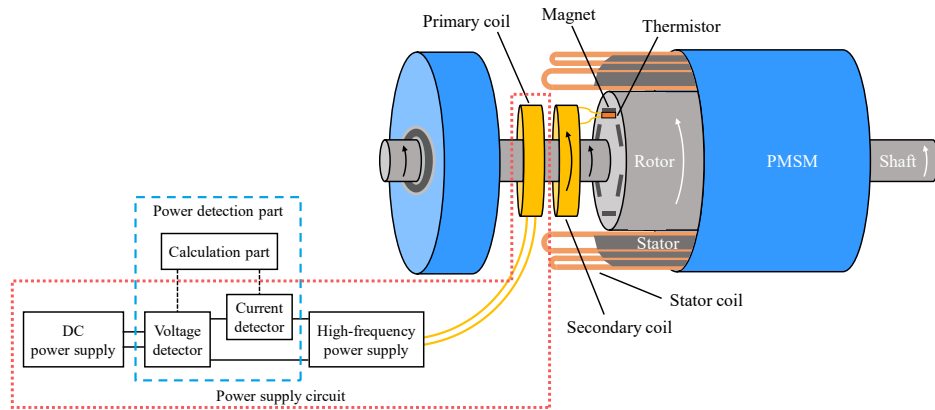


Fig. 1. Temperature detection system using electromagnetic induction.

ャフトの周囲に取り付けられる。

電力検出器は、直流電源から高周波電源に供給される直流電力を検出する。高周波電源は一次側コイルを介して、電磁誘導により二次側コイルを含む受電回路に電力を伝送する。受電回路が受け取った電力は、サーミスタにより消費される。なお、送電回路は PMSM 駆動用インバータとは別に設ける。

〈2・2〉 等価回路 本節では、提案装置の動作原理を説明する。Fig. 2 に提案装置の等価回路を示す。S-S 補償方式の磁界結合方式 WPT 回路の負荷に NTC サーミスタを接続した構造となっている。高周波電源（インバータ）と一次側回路が前節で述べた固定部に、二次側回路が回転部に相当する。

(1)式の共振条件が成立するとき、一次側電流 I_1 および二次側電流 I_2 の実効値はそれぞれ(2)式および(3)式で表される。ここで、 V_{1f} は一次側電圧 V_1 の基本波成分である。 I_1 および I_2 は、NTC サーミスタの抵抗 R_{TH} に依存する。

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (1)$$

$$I_1 = \frac{(r_2 + R_{TH})V_{1f}}{r_1(r_2 + R_{TH}) + (\omega_0 M)^2} \quad (2)$$

$$I_2 = \frac{\omega_0 M V_{1f}}{r_1(r_2 + R_{TH}) + (\omega_0 M)^2} \quad (3)$$

一次側電力 P_1 および二次側電力 P_2 はそれぞれ(4)式、(5)式で表される。インバータで発生する損失を無視すると、インバータに入力される直流電力 $P_{DC} = P_1$ であるので、 P_{DC} は(6)式で表される。 P_1 、 P_2 、 P_{DC} は、NTC サーミスタの抵抗 R_{TH} に依存する。

$$P_1 = \frac{(r_2 + R_{TH})V_{1f}^2}{r_1(r_2 + R_{TH}) + (\omega_0 M)^2} \quad (4)$$

$$P_2 = \frac{(\omega_0 M V_{1f})^2 R_{TH}}{\{r_1(r_2 + R_{TH}) + (\omega_0 M)^2\}^2} \quad (5)$$

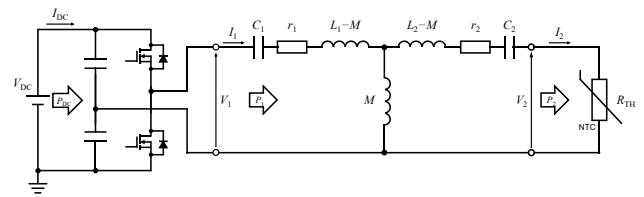


Fig. 2. Temperature detection circuit.

$$P_{DC} = \frac{(r_2 + R_{TH})V_{1f}V_1}{r_1(r_2 + R_{TH}) + (\omega_0 M)^2} \quad (6)$$

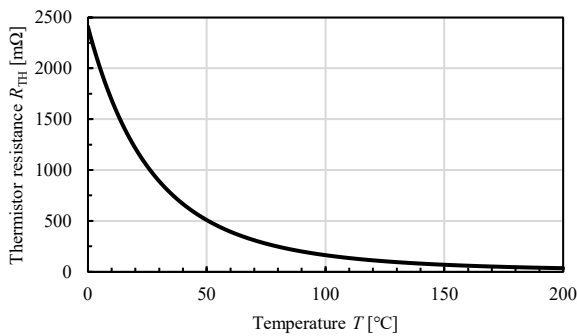
NTC サーミスタは、温度上昇に伴い抵抗が減少する。絶対温度 T における NTC サーミスタの抵抗 R_{TH} は(7)式で表される。ここで、 B は B 定数、 R_0 は基準温度 T_0 における抵抗である。

$$R_{TH} = R_0 \exp \left\{ B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right\} \quad (7)$$

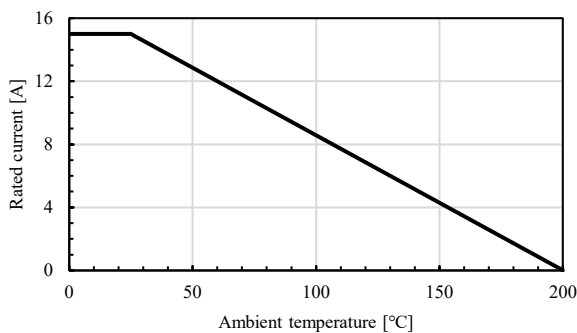
(6)式と(7)式より、提案装置におけるインバータの直流入力電力 P_{DC} は、NTC サーミスタの温度 T に依存することがわかる。したがって、回転部の NTC サーミスタにより測定された温度変化を、固定部の電力変化として検出することが可能である。

3. 試作機的设计

〈3・1〉 サーミスタの特性 Fig. 3 に試作機の実験に用いる NTC サーミスタ「BN-LG25Y1R0MYB」の温度特性を示す。抵抗 R_{TH} の温度特性は公表されていないため、実験により測定した値をもとに(7)式にフィッティングした。測定により得られた B 定数(25°C/85°C)は $B = 2750$ K、基準温度 $T_0 = 23.7^\circ\text{C}$ における抵抗は $R_0 = 1080$ mΩ である。温度 T の上昇に伴い抵抗 R_{TH} が減少する。また、周囲温度が 25°C を超えると定格電流が 15A から徐々に減少し 200°C で 0A となる。定格電力は 7 W である。

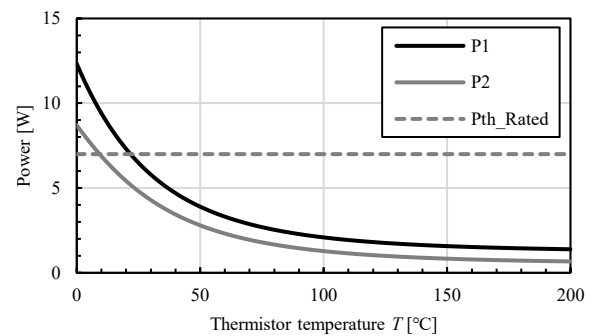


(a) Resistance at 100 kHz.

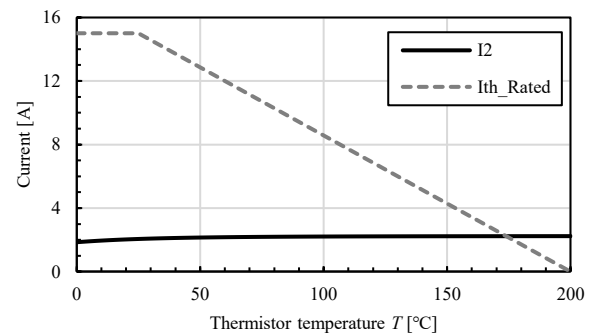


(b) Rated current derating.

Fig. 3. Temperature characteristics of BN-LG25Y1R0MYB.



(a) Primary side and Secondary side power.



(b) Secondary side current.

Fig. 4. Theoretical calculation of temperature characteristics.

Table 1. Circuit parameters.

Parameter	Symbol	Value
DC input voltage	V_{DC}	6 V
Resonant frequency	f	100 kHz
Primary coil inductance	L_1	7.4 μ H
Secondary coil inductance	L_2	7.34 μ H
Primary coil winding resistance	r_1	119 m Ω
Secondary coil winding resistance	r_2	112 m Ω
Primary resonant capacitor	C_1	339 nF
Secondary resonant capacitor	C_2	286 nF
Coupling coefficient	k	0.256
Mutual inductance	M	1.89 μ H

〈3・2〉 設計および理論式による計算 Table 1 に試作機のパラメータを示す。各パラメータは(3)式および(5)式に基づき、二次側電流 I_2 と二次側電力 P_2 がサーミスタの定格を超えないように設計した。なお、WPT 回路とサーミスタを接続するケーブルが長く、インダクタンスが約 1.15 μ H とコイルのインダクタンスに対して大きいため、二次側共振コンデンサ C_2 の値はこれを考慮して決定した。

Fig. 4 は、設計した試作機における各部電力と電流の温度

特性を、前章で示した理論式により計算したものである。なお、WPT 回路とサーミスタを接続するケーブルの抵抗 100 m Ω を考慮している。一次側電力 P_1 は、温度 T の上昇に伴い単調減少する。この特性により、電力から温度が一意に定まる。二次側電力 P_2 は、10°C 以上においてサーミスタの定格電力 7 W 未満である。また、二次側電流 I_2 は、170°C 以下においてサーミスタ定格電流のディレーティング以内である。したがって、10°C～170°C の温度範囲においてサーミスタの定格内で動作可能である。

〈3・3〉 実験システム Fig. 5 に実験用の空芯ソレノイドコイルを示す。Table 2 にコイルの仕様を示す。一次側、二次側とも同じ仕様のコイルを用いた。本来提案法では、2 章 1 節で述べたようにコイルを PMSM のシャフト周囲に取り付けることを想定している。しかし、本稿ではコイルが発する磁束が筐体の鉄製部品に鎖交することにより発生する鉄損等を無視するため、コイルは PMSM に取り付けずに実験を行った。

共振コンデンサ C_1 および C_2 に印加される電圧の実効値 V_{C1} , V_{C2} は、それぞれ(8)式と(9)式で表される。

$$V_{C1} = \frac{I_1}{\omega_0 C_1} = \frac{(r_2 + R_{TH})V_{1f}}{\{r_1(r_2 + R_{TH}) + (\omega_0 M)^2\}\omega_0 C_1} \dots\dots\dots (8)$$

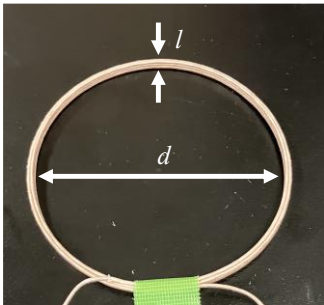


Fig. 5. Coil for experiment.

Table 2. Coil parameters.

Parameter	Symbol	Value
Diameter	d	75 mm
Length	l	3.2 mm
Turns	N	6

$$V_{C2} = \frac{I_2}{\omega_0 C_2} = \frac{MV_1 f}{\{r_1(r_2 + R_{TH}) + (\omega_0 M)^2\} C_1} \dots\dots\dots (9)$$

提案装置では温度変化に伴い負荷抵抗が大きく変化するため、 V_{C1} および V_{C2} も変化する。Fig. 6に V_{C1} および V_{C2} の計算値を示す。 V_{C1} はサーミスタの温度 T が低いほど大きく0°Cで28 V、 V_{C2} は T が高いほど大きく200°Cで17 Vとなる。 C_1 および C_2 は、これ以上の定格電圧を持つものを選定した。

WPT 回路は矩形波出力のハーフブリッジインバータにより駆動した。パワーメータにより、各部の電圧、電流、電力を測定した。サーミスタの温度は恒温槽により変化させた。恒温槽に入れたのはサーミスタのみである。サーミスタの表面に貼り付けた熱電対により測定した温度を、サーミスタの実温度とした。実験機の構成を簡単にするため、回転部に相当する二次側回路は回転させずに実験を行った。

4. 実験結果

〈4・1〉 インバータ入力電力の温度特性 恒温槽によりサーミスタ加熱し、インバータの直流入力電力 P_{DC} を測定した。各温度における P_{DC} の測定結果を Fig. 7 中のドットにより示す。 T の上昇に伴い P_{DC} は単調減少することが確認できる。したがって、直流入力電力を利用した温度検出が可能な特性を持つ。

〈4・2〉 回路パラメータの補正 Fig. 7中に破線で示すのは、(6)式と Table 1 に示すパラメータを用いて計算した P_{DC} の温度特性である。ドットで示した測定値を下回っており、一致していない。これは、配線抵抗等の寄生成分の考慮が不完全であるためであると考えられる。そこで、コイルの巻線抵抗 r_1 および r_2 に適当な値を加算することにより、計算値が測定値に一致するよう補正した。これは、等価回路に

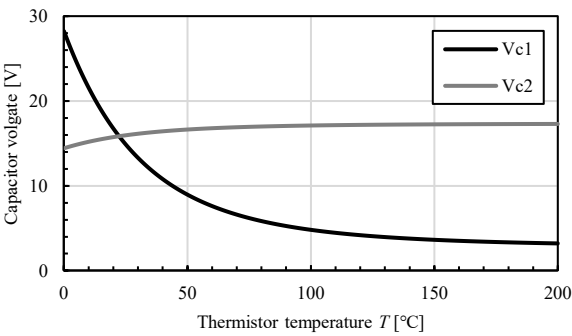


Fig. 6. Voltage applied to resonant capacitors.

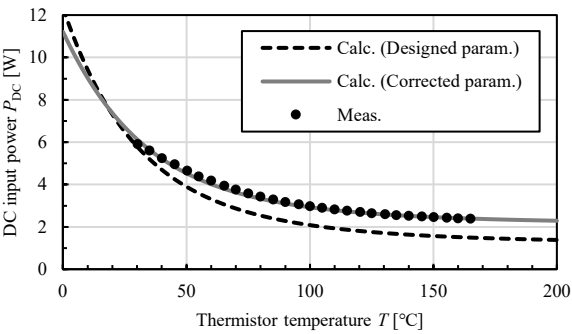


Fig. 7. Variation of DC input power according to thermistor temperature.

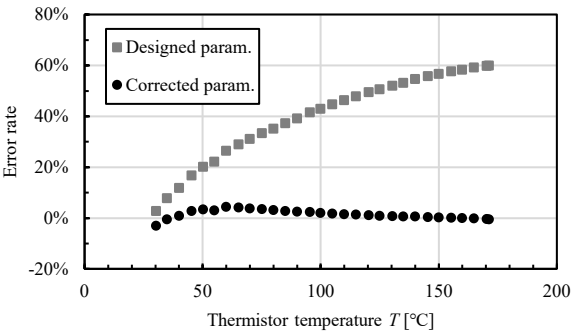


Fig. 8. Error rate of temperature characteristics of DC input power.

においてコイルに対して直列に抵抗を挿入するのと同義である。ここでは、 $r_1=220\text{ m}\Omega$ 、 $r_2=290\text{ m}\Omega$ とした。補正した r_1 および r_2 を用いて計算した P_{DC} の温度特性を Fig. 7 中の実線により示す。また、Fig. 8 に計算値に対する測定値の誤差率を示す。補正したパラメータを用いた方が精度良く近似できており、誤差率は±5%以内であることがわかる。次節で

は、補正したパラメータを用いて温度検出を行う。

〈4・3〉 温度検出精度の検証 本節では、2章2節で示した理論式を用いて、測定した直流電力から温度検出を行う。(6)式および(7)式を変形することで、(10)式と(11)式を得る。

$$R_{TH} = \frac{r_2 V_{1f} V_1 - (r_1 r_2 + (\omega_0 M)^2) P_{DC}}{r_1 P_{DC} - V_{1f} V_1} \dots\dots\dots (10)$$

$$T = \left(\frac{1}{B} \ln \frac{R_{TH}}{R_0} + \frac{1}{T_0} \right)^{-1} \dots\dots\dots (11)$$

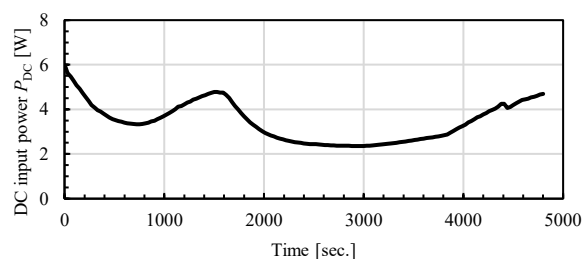
上式より、Fig. 2 の回路における各パラメータがわかれば、直流入力電力 P_{DC} から NTC サーミスタの温度 T を検出できることがわかる。

PMSM の力行時における発熱と停止時の冷却を想定して恒温槽によりサーミスタの温度を変化させ、インバータの直流入力電力を測定した。(10)式および(11)式と前節で示した補正パラメータ、Fig. 3 に示したサーミスタの特性を用いて、測定した直流入力電力 P_{DC} からサーミスタの温度 T を推定した。Fig. 9 (a)に直流入力電力 P_{DC} 、Fig. 9 (b)に熱電対により測定した実温度 T および推定温度 T_{est} の時間推移を示す。実温度 T が上昇すると直流入力電力 P_{DC} は減少し、 T が下降すると P_{DC} は増加している。推定温度 T_{est} は実温度に追従して変化している。Fig. 9 (c)に推定誤差を示す。誤差 11°C 以内で温度検出が可能であることを確認した。加熱時に比べて冷却時の誤差が大きいのは、サーミスタの熱時定数を考慮していないため実際の温度と熱電対で測定した温度に差が生じており、前章で示した温度特性の取得には加熱時の測定結果を用いたためであると考えられる。

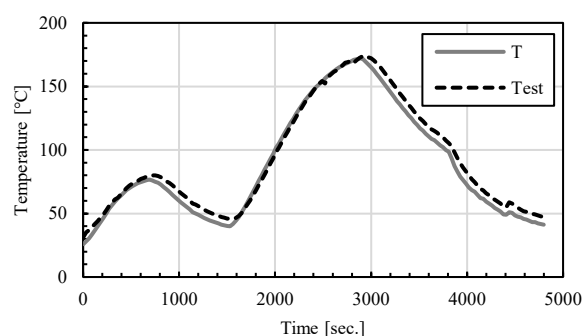
5. おわりに

本稿では、電磁誘導とサーミスタを用いた PMSM の磁石温度検出法を提案した。提案法は、磁界結合方式 WPT 回路と NTC サーミスタの特性により、WPT 回路の一次側電力が二次側に負荷として接続したサーミスタの温度に依存することを利用する。サーミスタの定格に基づいて試作機を設計した。実機実験により、WPT 回路に電力を供給するインバータの直流入力電力はサーミスタの温度上昇に伴い単調減少し、直流入力電力を用いて温度検出が可能である特性が得られることを確認した。取得した特性を用いてサーミスタの温度を推定した結果、推定誤差は 11°C 以内であった。

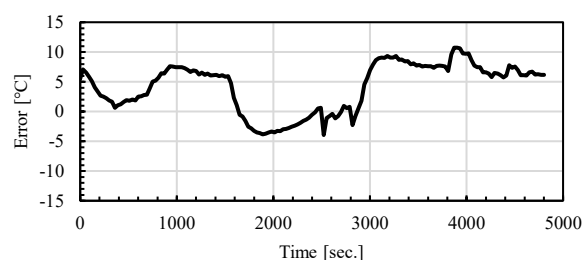
さらなる実用性を証明するには、コイルが発する磁束が PMSM の鉄製部品に鎖交することにより鉄損が発生する環境下でも温度検出が可能であることや、二次側回路の回転中にも温度検出が可能であることを実証する必要があると考えられる。



(a) DC input power.



(b) Temperature estimation.



(c) Estimation error.

Fig. 9. Experiment result.

文 献

- (1) 宮田浩二・青山康明・横山智紀・大橋健・近藤裕・松岡孝一：「着磁・減磁・渦電流損を考慮した永久磁石電動機の三次元磁界解析」，電学論 D, Vol.123, No.4 pp.401-408 (2003)
- (2) H. Jung, D. Park, H. Kim, S. Sul and D. Berry : “Non-Invasive Magnet Temperature Estimation of IPMSM Based on High-Frequency Inductance With a Pulsating High-Frequency Voltage Signal Injection”, Vol.55, No.3 pp.3076-3086 (2019)
- (3) 神谷宗宏・栗田秀哉・三浦徹也・柳生泰秀・小坂卓・松井信行：「キャリア高調波を考慮したハイブリッド車用埋込磁石形同期発電機の磁石温度解析」，電学論 D, Vol.127, No.12 pp.1238-1244 (2007)
- (4) A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, M. Shanel, M. Mueller and C. Mejjuto : “Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of

- Electrical Machines”, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.56, No.3 pp.871-882 (2009)
- (5) G. D. Demetriades, H. Z. d. l. Parra, E. Andersson and H. Olsson : “A Real-Time Thermal Model of a Permanent-Magnet Synchronous Motor”, IEEE Trans. Power Electron., Vol.25, No.2 pp.463-474 (2010)
- (6) B. Lee, K. Kim, J. Jung, J. Hong and Y. Kim : “Temperature Estimation of IPMSM Using Thermal Equivalent Circuit”, IEEE Trans. Magn., Vol.48, No.11 pp.2949-2952 (2012)
- (7) N. Simpson, R. Wrobel and P. H. Mellor : “An Accurate Mesh-Based Equivalent Circuit Approach to Thermal Modeling”, IEEE Trans. Magn., Vol.50, No.2 pp.269-272 (2014)
- (8) 今西裕人・西口慎吾 : 「電動車両用モータの磁石温度推定技術の開発」, 自動車技術会論文集, Vol.45, No.5 pp.841-845 (2014)
- (9) D. Reigosa, D. Fernandez, H. Yoshida, T. Kato and F. Briz : “Permanent-Magnet Temperature Estimation in PMSMs Using Pulsating High-Frequency Current Injection”, Vol. 51, No.4 pp.3159-3168 (2015)
- (10) H. Jung, H. Kim, S. Sul and D. Berry : “Magnet Temperature Estimation of Traction Motor in Standstill With Considering Spatial Harmonics”, Vol.68, No.11 pp.10546-10557 (2021)
- (11) 伊藤亮人・大石潔・横倉勇希・井出勇治・倉石大悟・高橋昭彦・北原通生 : 「静止座標系高周波電流注入方式による PMSM の巻線と磁石の同時温度測定の検討」, 電気学会研究会資料 (半導体電力変換／モータドライブ 合同研究会), SPC-22-166／MD-22-101 pp.127-132 (2022)
- (12) 北条善久 : 「温度検出装置」, 特許第 7201462 号 (2019-01-30 出願)