

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420243

研究課題名(和文) 省エネ・高効率永久磁石同期電動機の設計法の体系化と設計支援システムの構築

研究課題名(英文) Systematization of design method and construction of design support system for the energy saving and highly efficient permanent magnet synchronous motors

研究代表者

森本 茂雄 (Morimoto, Shigeo)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00210188

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：高効率電動機である永久磁石同期電動機について、要求仕様よりモータ構造とその基本構造パラメータを決定できる設計支援システムについて研究した。

まず、モータを駆動するときの電圧と電流の制約条件および制御方法を考慮して、要求される速度-トルク特性を満たすモータモデルのパラメータの範囲を導出した。導出されたモータパラメータとモータのパーミアンスモデルに基づき関係式より、永久磁石同期電動機の各種構造パラメータを決定するアルゴリズムを構築した。

研究成果の概要(英文)：For a permanent magnet synchronous motor which is a high efficiency electric motor, a design support system that can determine the motor structure and its basic structural parameters based on the required specifications was studied.

First, the range of the motor parameters satisfying the required speed-torque characteristics was derived considering the constraints of the voltage and current and the control methods. An algorithm for determining various structural parameters of the permanent magnet synchronous motor was constructed from the derived motor parameters and the relational expression based on the permeance model of the motor.

研究分野：電気機器工学・パワーエレクトロニクス

キーワード：永久磁石同期電動機 設計支援システム 高効率モータ

1. 研究開始当初の背景

永久磁石同期電動機（以下、PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor）は、現在最も高効率な電動機として低消費電力が要求されるエアコン・冷蔵庫などの家電機器、電気自動車やハイブリッド自動車など電動車両の駆動用電動機として実用化や研究開発が進展している。

電動機に要求される特性は、用途によって大きく異なる。一方、PMSMの回転子構造はこれまでに様々な構造が提案、適用されてきている。PMSMの速度-トルク特性や高効率運転領域などの特性は、モータ構造、特に回転子構造とその設計パラメータに依存する。これまでに個々の構造を基にして要求特性を満足する最適化設計については非常に多くの研究事例や報告があるものの様々な回転子構造と要求特性（速度-トルク特性や高効率運転領域など）の関係や要求特性からの回転子構造設計について俯瞰的に検討し、整理し、設計に展開されたことはない。

2. 研究の目的

様々な応用分野において高効率な PMSM の用途別最適設計をより短期間に効率的に行うために、要求仕様（速度-トルク特性や高効率運転領域など）よりモータ構造とその基本設計パラメータを決定できる設計支援システムを構築する。具体的には、PMSM の出力特性に関する要求仕様と体格に関する要求仕様により、モータのモデルパラメータを中間変数として PMSM の構造パラメータを決定するシステムについて研究する。

3. 研究の方法

(1) 要求出力仕様を満たす PMSM のモデルパラメータ範囲の導出

PMSM の最大出力制御法に基づき、与えられた電圧および電流の制約条件を考慮して、要求された速度-トルク特性を満足するモータモデルパラメータの範囲を明らかにする。

(2) SPMSM の構造パラメータの決定手法の導出と検証

表面磁石同期モータ（SPMSM）について、パーミアンス法を用いて導出される関係式や構造パラメータ間関係式を導出する。これら関係式と選択した要求仕様を満たすモータパラメータ（上記(1)で導出）および構造に関する要求仕様を基にモータの構造パラメータを決定する手法を検討する。この手法の有効性を磁界解析により確認する。

(3) IPMSM の構造パラメータの決定手法の導出と検証

SPMSM に比べて、ロータ構造が複雑となる埋込磁石同期モータ（IPMSM）について、SPMSM の場合と同様のアプローチでモータの構造パラメータを決定する手順を明らかにする。この手法の有効性を磁界解析により確認する。

4. 研究成果

(1) 要求出力仕様を満たす PMSM のモデルパラメータ範囲の導出

PMSM（SPMSM および IPMSM）において、電圧と電流の制限を考慮したときの出力特性（速度-出力特性）は d-q 座標系のモータパラメータ（ ψ_a : 永久磁石による電機子鎖交磁束、 L_d : d 軸インダクタンス、 L_q : q 軸インダクタンス）によって決まる。そこで、要求出力仕様を満たすモータモデルパラメータの範囲を表す境界線の関係式をトルク式、最大出力制御時の d、q 軸電流の関係式およびインバータ耐圧の関係式より導出した。

図1に示すような2つの要求出力ポイント（条件1:速度 N_1 、トルク T_1 、条件2:速度 N_2 、トルク T_2 ）を満足するモータパラメータの範囲が図2のように4つの境界線（境界線、境界線、境界線、境界線）に囲まれた領域として得られる。なお、同図では、突極比 $\rho (=L_q/L_d)$ をパラメータとしている。 $\rho=1$ のとき表面磁石同期モータ（SPMSM）を、 $\rho>1$ のとき埋込磁石同期モータ（IPMSM）を表している。

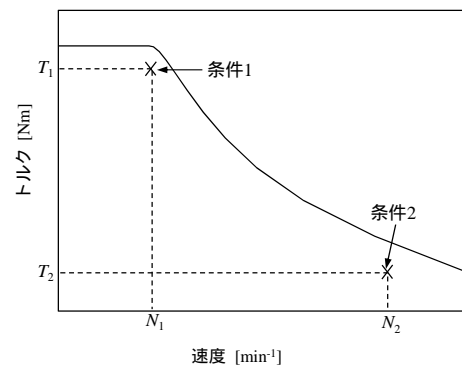


図1 条件1、2の出力ポイントと速度-トルク特性の例

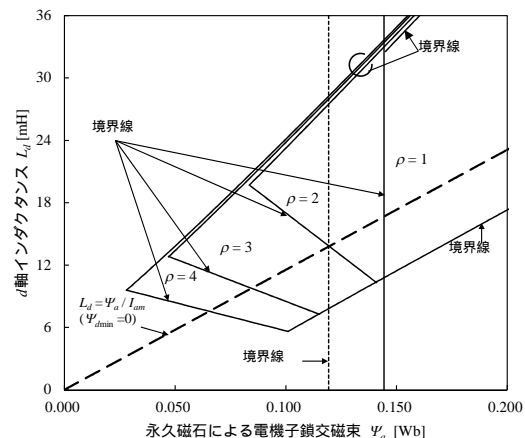


図2 モータモデルパラメータの範囲

図2で表したモータモデルパラメータ範囲内のモータパラメータを有する PMSM を設計すれば図1で表したような要求出力ポイントを満足する速度-トルク特性を有する PMSM が得られる。

(2) SPMSM の構造パラメータの決定手法の導出と検証

図3にSPMSMの基本構造と構造パラメータを示す。

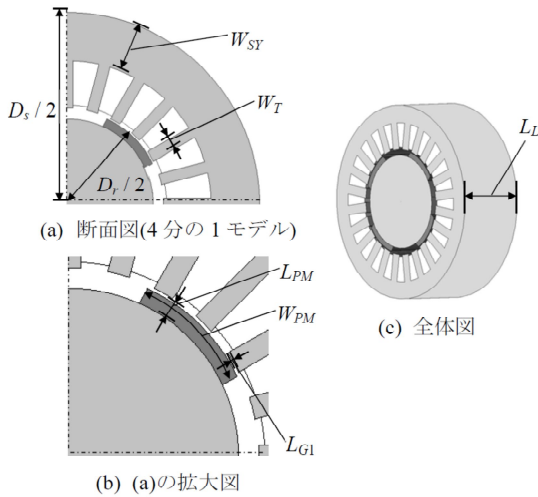


図3 SPMSMの基本構造と構造パラメータ

まず、図3示した構造パラメータとモータモデルパラメータとの関係式をパーミアンスモデルを用いて導出した。この関係式と要求出力仕様を満足するモータパラメータの範囲を利用して、次の手順でSPMSMの構造パラメータを導出した。

- () モータモデルパラメータの選択
- () 体格に関する要求仕様
- () 経験的に得られている構造パラメータ間の関係式
- () モータモデルパラメータ (ψ_a および L_q) と構造パラメータとの関係式

() のモータパラメータは図2のように得られた要求出力仕様を満足するモータモデルパラメータの範囲から選択する。() については、ステータ外径 D_s 、エアギャップ長 L_G 等を要求される体格に基づき設定する。また () に関しては、パーミアンス法により得られた関係式を利用する。

図2に示したような要求出力仕様を満足するモータモデルパラメータの範囲から2種類のモータモデルパラメータを選択し、上記手順で設計した。得られたモータモデル(SPM-1およびSPM-2)を図4に示す。モータモデルパラメータが異なるため、両モデルの構造寸法が異なっている。

設計されたモータが、要求出力仕様を満足しているか確認するために有限要素法に基づく磁界解析ソフト(JMAG)を用いて解析を行った。図5に解析結果から得られた各モデルの速度-トルク特性を示す。図5より、設計した2種類のSPMSM(SPM-1およびSPM-2)はともに出力に関する要求仕様(図中の条件1および条件2)を満たしていることがわかる。従って、提案システムによるSPMSMの設計手法が有効であることが確認できた。

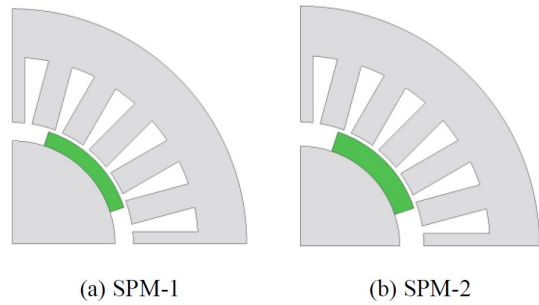


図4 設計されたSPMSMのモデル

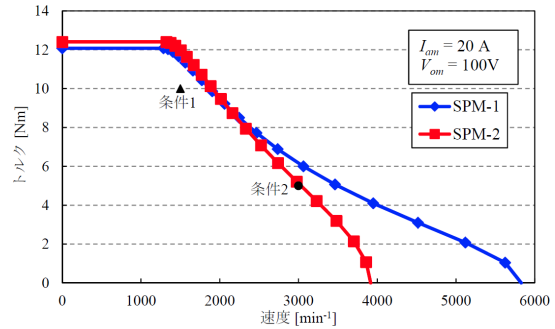


図5 設計されたSPMSMの速度-トルク特性

(3) IPMSM の構造パラメータの決定手法の導出と検証

図6にIPMSMの代表的な磁石の埋込方法である横埋込形IPMSMの基本構造と構造パラメータを示す。SPMSMに比べて磁石配置の自由度が増すため磁石埋込深さ L_{RY} といった構造パラメータが追加されている。

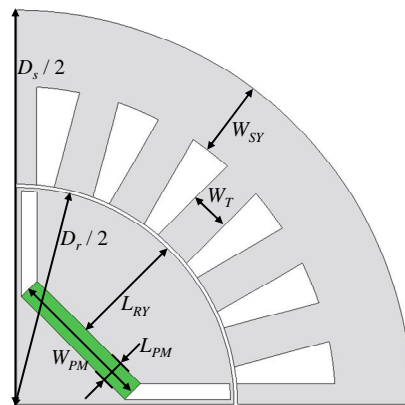


図6 IPMSMの基本構造と構造パラメータ

IPMSMの構造パラメータの決定手順も基本的にSPMSMの場合と同様である。ただし、図2に基づきモータモデルパラメータを選択する際に、IPMSMでは $\rho > 1$ ($L_q > L_d$) となるため、選択の範囲が広がる。また、 ψ_a および L_q と構造パラメータとの関係式はSPMSMの場合と若干異なる。

要求出力仕様を満足するモータモデルパラメータに基づき設計されたIPMSMの構造パラメータを表1に示し、有限要素法による磁

界解析結果から得られた速度 - トルク特性を図7に示す。

表1 提案手法を用いて得られた構造寸法

項目 [単位]	算出結果
ステータ外径 D_s [mm]	112
エアギャップ長 L_G [mm]	0.5
ロータ外径 D_r [mm]	61.6
積厚 L_L [mm]	41.1
ステータヨーク幅 W_{SY} [mm]	10.8
ティース幅 W_T [mm]	5.67
磁石の幅 W_{PM} [mm]	20.7
磁石厚さ L_{PM} [mm]	3.17
磁石埋め込み深さ L_{RY} [mm]	16.33

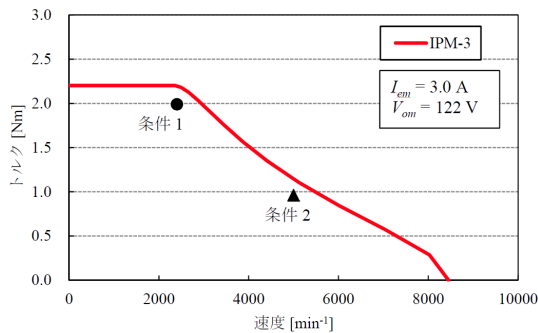


図7 設計された IPMSM の速度 - トルク特性

図7より、設計された IPMSM (IPM-3) は出力に関する要求仕様 (図中の条件1、2) を満たしていることが分かる。従って、提案システムによる IPMSM の設計手法が有効であることが確認できた。

(4) 提案手法のまとめ

本研究で検討した PMSM 設計支援システムの全体像を図8に示す。

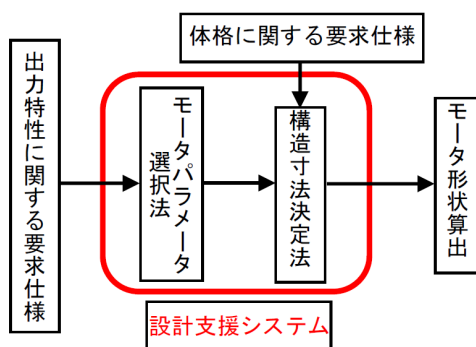


図8 PMSM の設計支援システムの構造

提案した設計支援システムは、出力特性に関する要求仕様と体格に関する要求仕様によりモータ形状を決定するものであり、その過程にモータモデルパラメータを陽に扱っているのが特徴である。提案システムは、SPMSM および IPMSM に適用可能であり、その有効性を磁界解析で検証した。本システムは、

PMSM の詳細な構造寸法の設計までは扱うことができないが、モータ全体の概形を決定する上で有効である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計5件)

山野謙太、森本茂雄、真田雅之、井上征則、埋込磁石同期モータの要求出力仕様を満たすモータパラメータ選択法、平成28年電気関係学会関西連合大会、2016年11月22日、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス (大阪府・堺市)

K. Yamano, S. Morimoto, M. Sanada and Y. Inoue, Basic Study on Design of Surface Permanent Magnet Synchronous Motor Using Design Assist System of PMSM, The 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2016)、2016年11月13日、アパホテル&リゾート東京ベイ幕張 (千葉県・千葉市)

山野謙太、森本茂雄、真田雅之、井上征則、PMSM の設計支援システムを用いた IPMSM の設計に関する基礎検討、平成28年電気学会産業応用部門大会、2016年8月30日、群馬大学荒牧キャンパス (群馬県・前橋市)

山野謙太、森本茂雄、真田雅之、井上征則、PMSM の設計支援システムを用いた SPMSM の設計に関する基礎検討、平成28年電気学会全国大会、2016年3月18日、東北大学 (宮城県・仙台市)

山野謙太、森本茂雄、真田雅之、井上征則、モータパラメータを利用した SPMSM の設計支援システムに関する基礎検討、平成27年電気関係学会関西連合大会、2015年11月15日、摂南大学 (大阪府・寝屋川市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森本 茂雄 (MORIMOTO, Shigeo)
大阪府立大学・工学研究科・教授
研究者番号: 00210188

(2) 研究分担者

真田 雅之 (SANADA, Masayuki)
大阪府立大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 90264803

井上 征則 (INOUE, Yukinori)
大阪府立大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 50580148