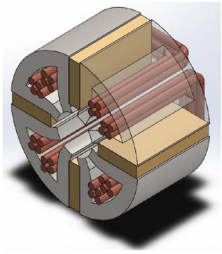
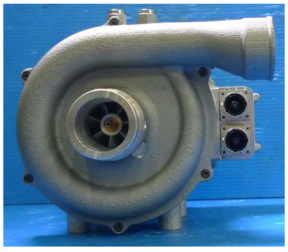
自動車ターボ用高速単相モータの開発

Development of High Speed and Single Phase Motor
for Automotive Turbocharger





山下 幸生[*1] Yukio Yamashita
磯部 真一[*2] Shinichi Isobe
ジワリヤウェート ウィツター[*3] Vissuta Jiwariyavej
内藤 あゆみ[*4] Ayumi Naito
柴田 直道[*5] Naomichi Shibata
安 秉一[*6] Byeongil An

当社では，製品の電動化が進展する中，各製品の特徴にマッチし，製品性能の最大化と小型・低コスト化を両立可能なカスタマイズされたパワーエレクトロニクス（モータ・インバータ）を開発している。その一例が，当社及び三菱重工エンジン&ターボチャージャ（株）（以下，MHIET）で開発中の電動スーパーチャージャ用高速モータである。要求される過給圧と高レスポンス性を備えつつ大衆車にも搭載可能な低コスト化を実現すべく，シンプルな構造の「単相磁束スイッチングモータ」を採用した試作機で性能を実証済である。当社では，多岐にわたる製品に適したモータの開発を推進することでお客様の期待に応えていく。

1. はじめに

環境問題及び資源枯渇の問題から，世界各地の CO2 排出量規制（燃費規制）は年々厳しくなっている。この規制はさらに厳しくなることが必至で，ハイブリッド電気自動車（HEV），電気自動車（EV），燃料電池自動車（FCV）等の電動化された車両が増えているが，世界的に見れば当面はエンジン車が大多数を占め，その燃費低減技術は必須である。エンジンの燃費低減技術としては，ダウンサイジング・ダウンスピーディングが普及しており，既に過給技術は必須のものとなっているが，今後は熱効率の改善を目的としたミラーサイクル燃焼やリーンバーン燃焼等の新しい燃焼技術が実用化され，より高応答かつきめ細かな過給圧制御が求められるようになる。

この要求に応え得る製品である電動スーパーチャージャは，欧州を中心とした車載電装品の 12V から 48V への高電圧化により，同一消費電力でも低電流で駆動できるようになったことから、高級車クラスへの適用が始まっている。

本報では，電動スーパーチャージャ普及の課題である低コスト化を実現するパワーエレクトロニクス技術（モータ・インバータ）について紹介する。

2. 48V 電動スーパーチャージャの開発仕様

当社で開発した 48V 電動スーパーチャージャの仕様を表 1 及び図 1 に示す。車両加速時の高応答過給が求められる時間を 0.3s と想定し，その間は加速エネルギーを含めて最大出力7kW で，加速完了後は出力5kW で 30s 間の短時間運転が可能である。出力が3kW であれば連続運転も可能である。モータ・インバータの冷却方式は水冷である。ベアリング形式には，潤滑用グリス封入のボールベアリングを採用している。

*1 総合研究所 電気・応用物理研究部 室長 技術士（電気電子部門）
*2 総合研究所 電気・応用物理研究部 主席研究員
*3 総合研究所 電気・応用物理研究部 PE(Electrical)
*4 総合研究所 電気・応用物理研究部
*5 三菱重工エンジン&ターボチャージャ（株） ターボ事業部技術部
*6 三菱重工エンジン&ターボチャージャ（株） ターボ事業部技術部 主席チーム統括 工博

表1 当社電動スーパーチャージャの開発仕様

項目		仕様
入力電圧		48V
最高回転数		80 000rpm
出力	瞬時	7kW (0.3s)
	短時間	5kW (30s)
	連続	3kW
応答性		0.3s (0→80 000rpm)
冷却方式		水冷
軸受方式		グリス封入玉軸受

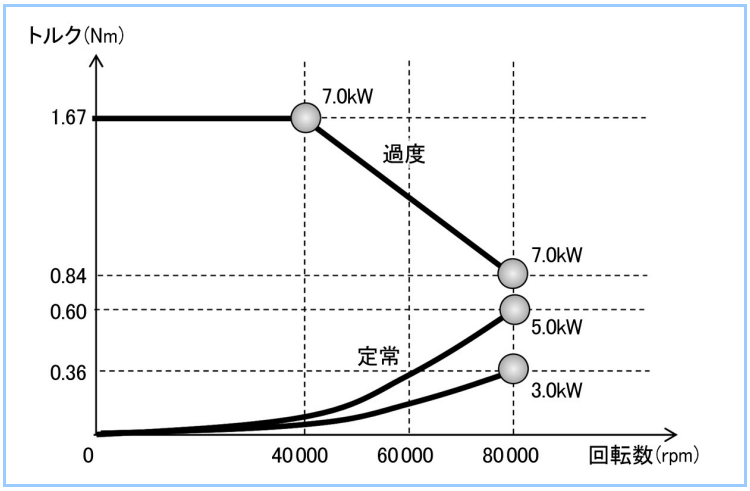


図1 当社電動スーパーチャージャ用モータの開発仕様

3. 高速単相磁束スイッチングモータ

HEV や EV のモータ形式としては磁石モータが広く採用されている。しかし強力な磁力を有する希土類磁石には，埋蔵量や高コストという調達上の課題があるほか，高温や逆磁界で不可逆減磁を起こすという特性に十分留意した設計・運用が必要となり，磁石の形状・配置や冷却構造が複雑になるという課題もある。

そこで当社及び MHIET では，希土類磁石を使用せず，かつシンプルな構造で低コスト化が可能なモータ形式である「磁束スイッチングモータ(Flux Switching Motor, FSM)」を他社と共同開発中である。ブラシレス構造と H ブリッジ回路による単相駆動が特徴である。以下で詳しく説明する。

3.1 特徴

当社電動スーパーチャージャに適用した磁束スイッチングモータは以下の特徴を持ち，モータ形式分類例での位置付けを図2に，他形式モータとの比較を表2に示す。

表2 モータ形式の比較

モータ形式	磁束スイッチングモータ (FSM)	SR モータ (SRM)	磁石同期モータ (PMSM)
コスト	○低 △ 希土類磁石不使用 (フェライト磁石 or 巻線界磁) ○ パワー半導体素子数少	△中 ○ 磁石不使用 × 高性能マイコン使用	×高 × 希土類磁石使用 × 磁石保持構造必要
システム効率	△中(～90%) △ 銅損中 (界磁弱 or 巻線界磁)	×低(～88%) × 銅損大(界磁利用なし)	○高(90%～) ○ 銅損小(磁石界磁利用) △ 磁石渦電流損あり
振動・騒音	△中 △ パルス状電流だが界磁によるマグネットトルクも利用	×高 × パルス電流によるリラクタンストルクのみ利用	○低 ○ 正弦波電流による滑らかな駆動
駆動回路	単相インバータ	単相インバータ×相数	三相インバータ

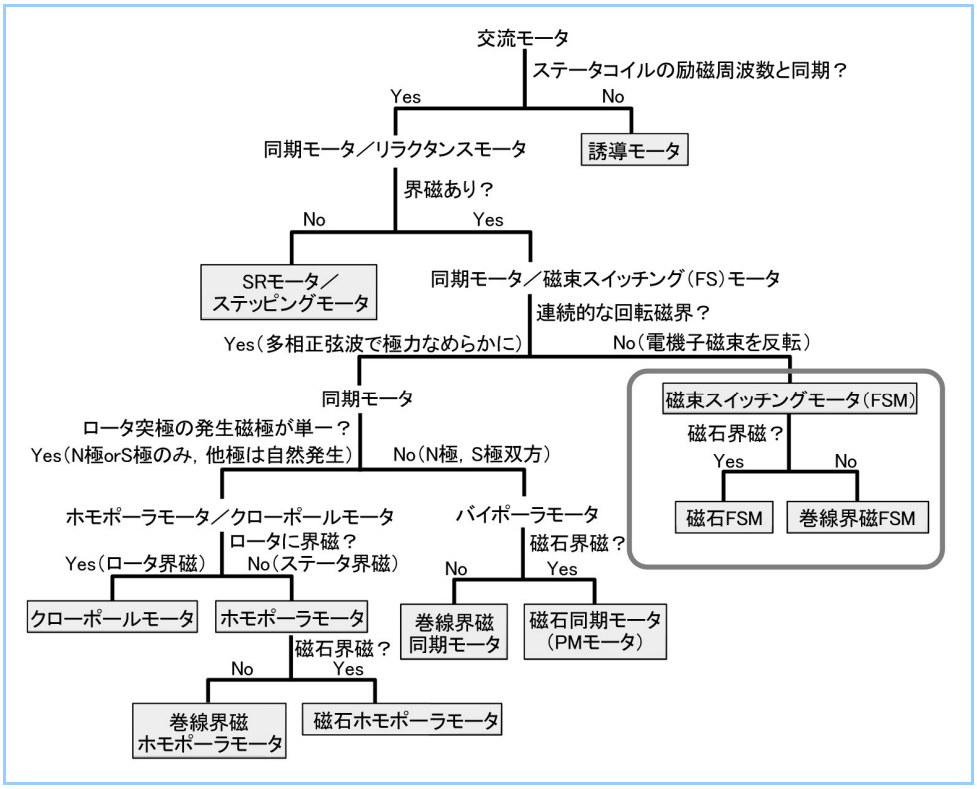


図2 磁束スイッチングモータのモータ形式分類例

- ロータに磁石がないので，遠心力の保持が不要で，冷却が必要な場合も容易である。
- 界磁が存在するのでマグネットトルクも利用可能で，SR モータ(Switched Reluctance Motor)と比較すると電磁振動・騒音の低減を期待できる。
- ステータ巻線に回転磁界を必要としないので，磁石モータ(Permanent Magnet Synchronous Motor，PMSM)のような三相巻線及び三相インバータが不要で，半導体スイッチング素子数の低減，安価マイコンの採用により低コスト化が期待できる。

3.2 構造

(1) モータ

図3に界磁を磁石で発生させるタイプで2極の磁束スイッチングモータの構造とロータ回転位置 45deg(機械角)毎のコイル鎖交磁束の様子を示す。コイルへの通電はない，無負荷の状態を示した図である。コイルの巻き方向を図示の通りとすると，ロータ回転角0deg，90deg では合計の鎖交磁束はゼロとなる。回転角 45deg と 135deg では最大の磁石磁束がコイルに鎖交するが，その向きは逆となる。このロータ回転位置による鎖交磁束の変化を三角波すなわち増減が線形であると仮定すると，そのときのコイル誘起電圧は図4の1段目・2段目のようになる。ここで，図4の3段目のようにコイル通電電流が理想的に誘起電圧の方形波と同形状に制御できるとすると，一定のトルクが得られる。なお実際には，コイルのインダクタンスや漏れ磁束や鉄心の磁束飽和による非線形性のため，トルクは一定とはならず，瞬間的な減少や負値にもなり得る。定性的には，ロータ位置 90deg(機械角)毎に電機子コイルの通電方向を切り替える(スイッチする)ことで，界磁と電機子の合成磁束の方向が変化し，一定方向のトルクを発生することになる。ロータ極数を $2p$ とすると，回転数 Nrpm の場合には，正負電流1周期を $f=2p\times N/60=pN/30Hz$ の周波数で制御する必要がある。通電方向切替周波数は低い方が，必要とされる制御演算速度が下がるし，また鉄心(電磁鋼板)の鉄損も低減できるため，最低極数である2極が適しているように思われるが，今回の試作では以下の理由から4極を採用した。図5に示すのは，2極の磁石界磁型 FSM で磁石やコイル形状を工夫した3タイプである。(a)は界磁磁束の寄与分を増やすために磁石幅を広げている。(b)では(a)の同一スロット内で逆向きコイルを省略して全節巻にしている。銅損が減少し効率改善が期待できる。(c)はコイルをスロット間に渡

らせることなくトロイダル型に配置したものである。コイルエンド長を短くでき，軸方向長を抑制できる一方，外径側にはコイルがはみ出てしまう。軸方向・外径方向ともにモータサイズを極力小さくするため，当社では(b)タイプでロータ4極を選択した。4極とすることで，全節巻のコイル渡り線のコイルエンド長増加を抑制することができる。図6に最終的なモータ構造を示す。図7は磁石とコイル部分だけを抽出した図で，コイルの巻き方は重ね巻きではなく波巻きとすることで，さらにコイルエンド長の増加を抑制している。

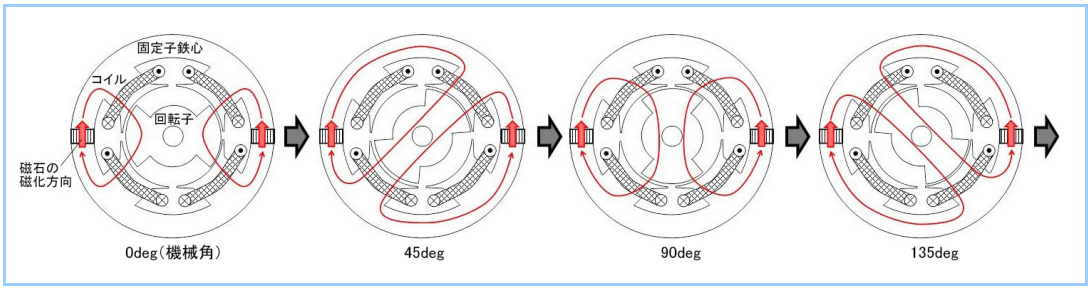


図3　無負荷(コイル無通電)時の鎖交磁束線の様子

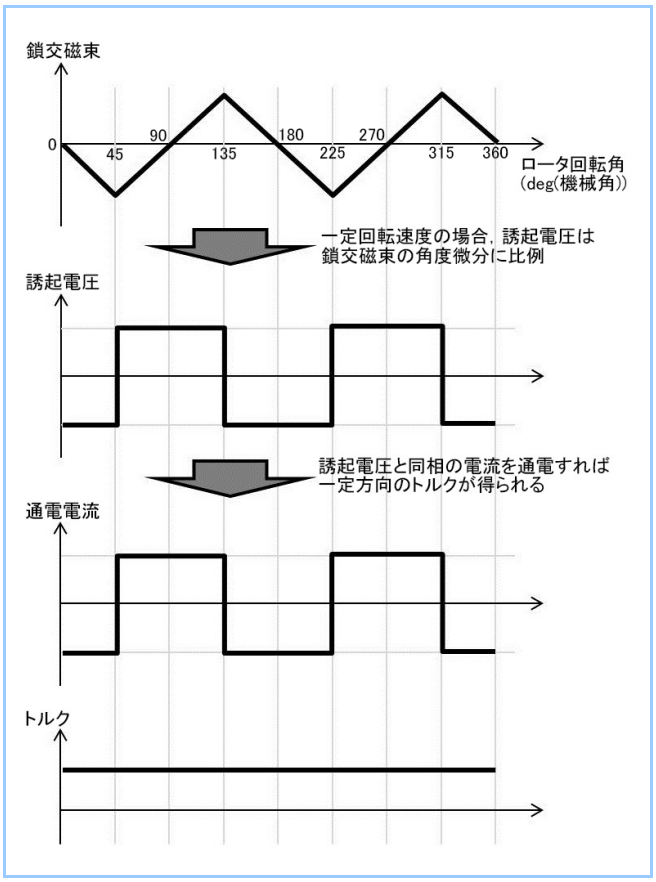


図4　コイル鎖交磁束の線形増減と誘起電圧と完全同相電流を仮定した場合のトルク波形

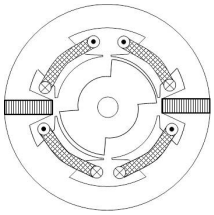
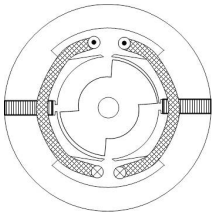
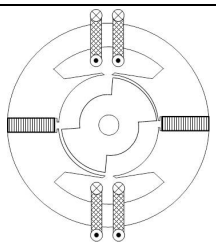
(a)磁石量増加型	(b)全節巻型	(c)トロイダル巻型
		
磁石幅を広げ界磁磁束の寄与分を増やせる	同一スロット内の逆向きコイルを省略(全節巻)し，銅損を減らせる	コイルエンド長が短く軸方向長を抑制できる。一方で外径長にコイルがはみ出る

図5　磁石やコイル形状を工夫した磁束スイッチングモータ

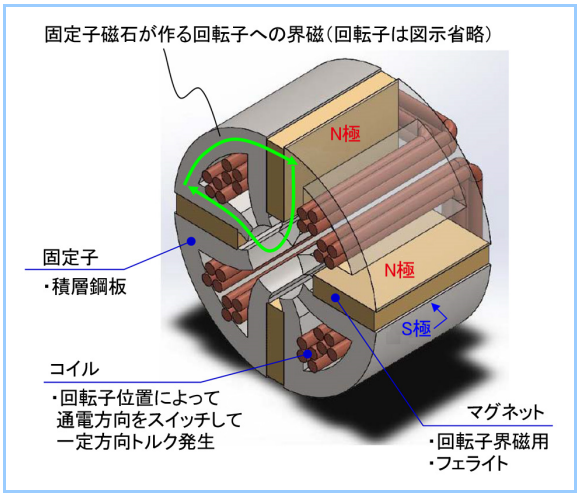


図6 磁石界磁型磁束スイッチングモータの構造

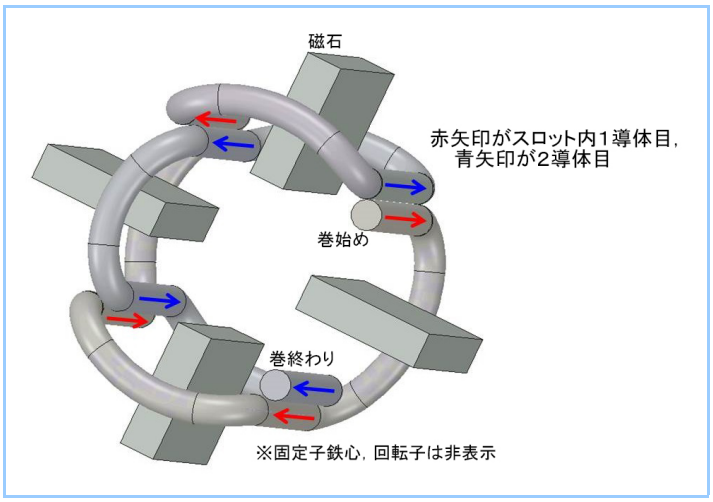


図7 波巻きコイルの構造

(2) インバータ

図8に磁束スイッチングモータの基本的な駆動回路と通電モードを示す。3つの通電モードの組み合わせで電機子コイルの電流方向と電流値を制御することができる。図6のタイプの磁束スイッチングモータの場合，4極であるのでロータが機械角 45 度回転する毎に通電方向を切り替える。その切替周波数は，80000rpm の場合，5.3kHz に達する。基本周波数としては，同じロータ極数の永久磁石モータと比較すると2倍になるが，ベクトル制御のような複雑な演算処理を必要としない制御法(通電角切替タイミング検知法)を採用しており，問題なく低コストの市販マイコンで制御演算を実行できている。図9にモータと一体化されたインバータの外観を示す。

(3) 全体

図 10 に上述のモータ・インバータを搭載した電動スーパーチャージャ外観を示す。

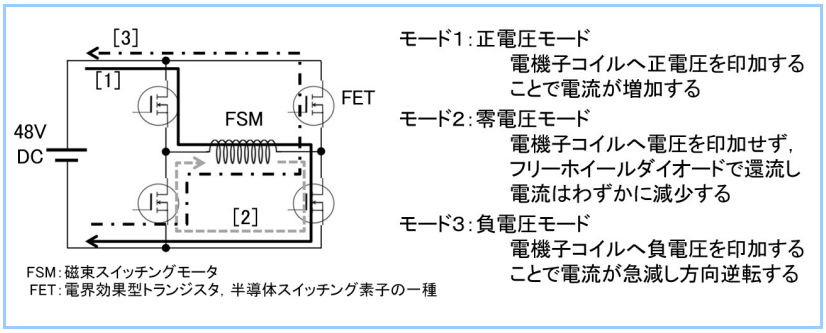


図8 単相磁束スイッチングモータの駆動回路と通電モード

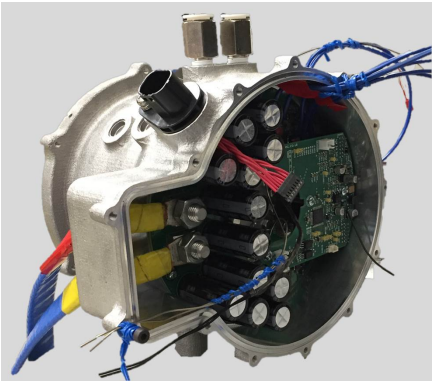


図9 モータと一体化されたインバータの外観

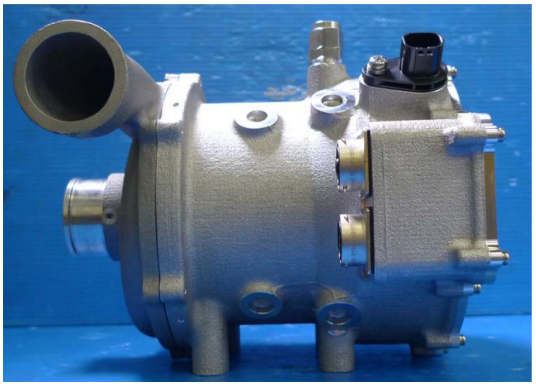


図 10 磁束スイッチングモータを搭載した電動スーパーチャージャ外観

3.3 実証結果

制御調整過程での応答性試験の結果例を図 11 に示す。本例の後も小型化・低コスト化の改良を進め，表1，図1に示した定常特性と過渡特性について概ね達成している。そのモータを搭載した2ステージ電動スーパーチャージャの特性については次号以降で紹介する予定である。

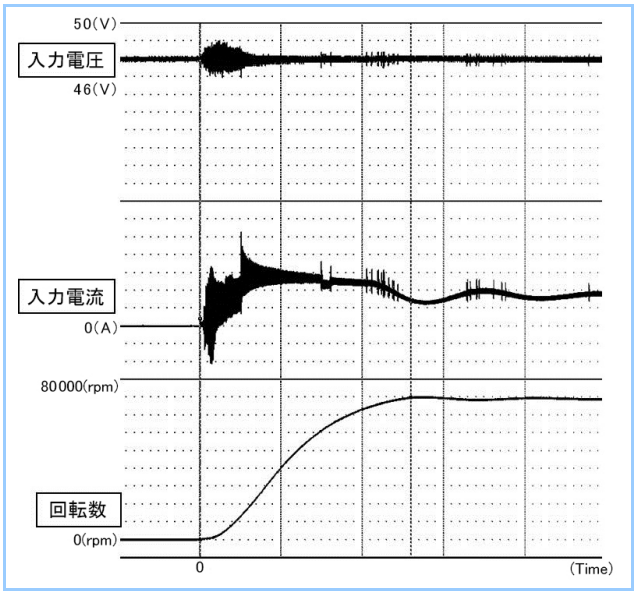


図 11 高速応答試験結果例

4. まとめ

当社では，製品の電動化が進展する中，各製品の特徴にマッチし，製品性能の最大化と小型・低コスト化を両立可能なカスタマイズされたパワーエレクトロニクス(モータ・インバータ)を開発している。本報では，MHIET の自動車用電動スーパーチャージャを例に，ターボチャージャ製品特有の高速仕様でかつ低コスト化が可能な単相モータとして開発中の磁束スイッチングモータについて紹介した。当社及び MHI グループ会社の製品には，市販のモータや発電機ではカバーできない高速仕様や低速大トルク仕様，さらには特殊環境下での動作が求められるケースもあり，常に最新の技術を社内外・国内外から積極的に取り入れることでお客様の期待に応えていく所存である。

参考文献

(1) 安秉一ほか，自動車向け電動2ステージターボシステムの開発，三菱重工技報 Vol.52 No.1 (2015) p.76～81
(2) 山下幸生ほか，自動車用エンジンのダウンサイジングに貢献する電動スーパーチャージャの開発，三菱重工技報 Vol.47 No.4 (2010) p.12～17
(3) Y. Yamashita (MHI), B. An (MHIET), C. Pollock (Technelec, Ltd.) et al., Two stage boosting system using 48 volt electric compressor, 22nd Supercharging Conference 2017
(4) C. Pollock, H. Pollock et al., Flux Switching Motors for Automotive Applications, Transactions IEEE Industry Applications Society, Vol.42, No.5, Sept/Oct 2006, pp.1177-1184.
(5) Y. Chen, Z. Q. Zhu, D. Howe (Sheffield University), Three dimensional lumped parameter magnetic circuit model for analyzing single-phase flux-switching PM motor, IEEE Trans. Ind. Appl. Vol.44 no.6(2008) pp.1701-1710