

高調波電流による多相永久磁石モータの高性能ドライブ

東京工業大学 工学院電気電子系

藤井 勇介

1. はじめに

永久磁石モータは高効率な特性を有するため、エアコン・洗濯機・ロボット・自動車用途などの分野で広く使用される。永久磁石モータは、三相巻線が固定子に施されており、三相電流を流すことで駆動される。しかしながら、巻線の経年劣化や、過電流による巻線間の短絡により巻線が破損した場合、残りの2相でモータを駆動するため、著しく性能が低下する⁽¹⁾。特に、この破損時の性能劣化が直接的に影響する自動車駆動用モータでは、大きな問題である。

この破損時の影響を軽減するために、巻線を5相や6相などの多数の相数（三相以上）にした多相永久磁石モータが研究開発されている⁽²⁾。1相破損した場合でも、残り三相以上あるため、性能低下を回避できる。一方で、半導体を搭載したインバータの相数も増加するため、コストの増加が懸念される。

本研究では、高トルクおよび低騒音を両立する多相永久磁石モータの高性能ドライブを目的とする。従来の多相モータでは、単に安全性の確保を目的に多相化が行われており、多相駆動の利点を十分に活かしているとは言い難い状況であった。本提案手法は、多相巻線に高調波電流を流すことで、高トルクおよび低騒音という新たな付加価値を創出し、産業界と学術界の発展に大きく貢献する。

2. 高トルク化と低騒音化のトレードオフ関係

図1(a)に高トルク化を可能とする三相8極9スロット構造の表面貼付け永久磁石（SPM）モータを、図1(b)に三相8極18スロット SPM モータを示す。表1と表2に、対象モータの寸法および材料と巻線仕様を示す。モータのトルク性能と振動騒音性能は、ギャップの磁束密度分布に依存する。よって、磁束密度の分布に着目する。

図2に、電流により発生する(a)ギャップ磁束密度波形と(b)その空間高調波（FFT 結果）の比較を示す。8極、すなわち空間4次がトルクを発生する主成分である。8極9スロットのギャップ磁束密度の特徴を以下に記す。

三相8極9スロット SPM モータ（図2の青色）

(1) トルク発生に寄与する4次の磁束密度が高い。つまり高トルク化に貢献する。

(2) 一方、1次、2次の低次磁束密度が発生する。これは振動騒音を悪化させる。

(3) 4次近傍である5次の磁束密度が発生する。これも振動騒音を悪化させる。

上記の(1)の長所を維持しながら(2)(3)を改善する、8極18スロット構造が開発されている。

三相8極18スロット SPM モータ（図2の赤色）

(1) 図2(b)より4次成分の振幅は8P9Sと同程度であり、高トルク化の長所を維持する。

(2) 低次の1次をキャンセルしたが、2次の低次磁束密度は、依然と残る。

(3) 4次近傍の5次磁束密度をキャンセルした。これにより、振動騒音の低減が期待される。

したがって、8P18Sでは(2)の課題が残り、三相駆動では全てを改善することは困難である。

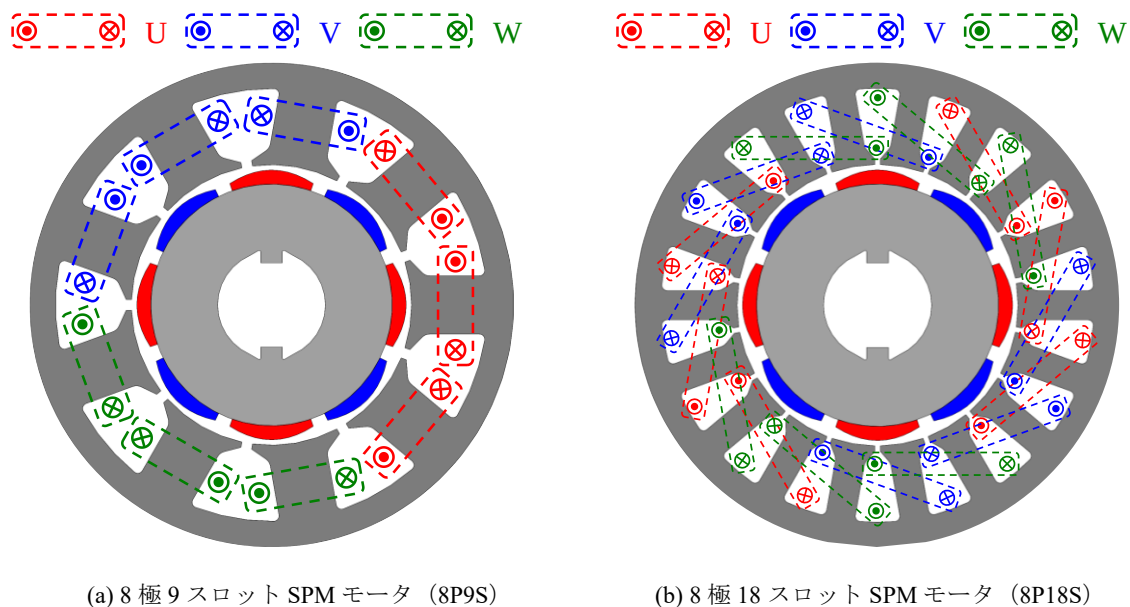


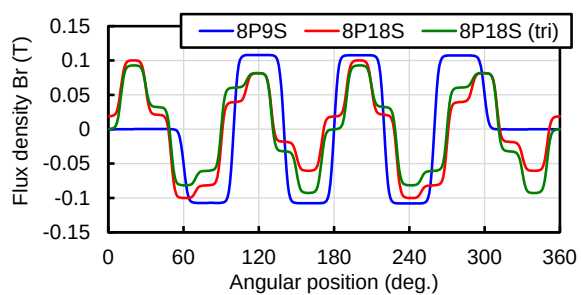
図 1 対象モータの構造

表 1 対象モータの寸法

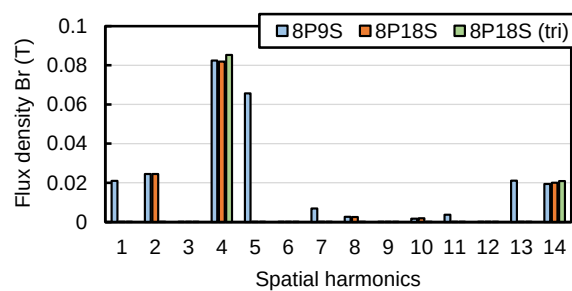
8P9S と 8P18S で共通の寸法		
固定子外径	90 mm	
固定子内径	52 mm	
積厚	50 mm	
バックヨーク幅	4.9 mm	
異なる寸法	8P9S	8P18S
ティース幅	10.8 mm	5.4 mm
スロット断面積	79.0 mm ²	39.3 mm ²

表 2 材料と巻線の仕様

固定子コア	35H360
回転子コア	S45C
コイル	銅
永久磁石	N42SH
巻線構成	二層短節集中巻
ターン数	8P9S : 32 ターン
	8P18S : 16 ターン



(a) ギャップ磁束密度波形



(b) 空間高調波

図 2 ギャップ磁束密度

3. 三重三相(多相)巻線を用いた高性能ドライブ

2章では、三相巻線の構成を工夫することで、磁束密度の1次磁束密度および5次磁束密度をキャンセルできることを示した。しかし、2次の磁束密度は依然と残った。そこで、三重三相(多相)巻線を用いた高性能ドライブを検討する。

図3に、提案する三重三相巻線を用いた8極18スロットSPMモータを示す。図中では、巻線はU相のみ描画している。U相巻線は、U1, U2, U3の3組に分けられる。三相モータでは、この3組に共通の電流を流す。提案手法では、U1, U2, U3に、位相の異なる電流を以下のように、供給する。

$$i_{u1}(t) = I \sin(\omega t)$$

$$i_{u2}(t) = I \sin(\omega t + \theta_2)$$

$$i_{u3}(t) = I \sin(\omega t + \theta_3)$$

(1)

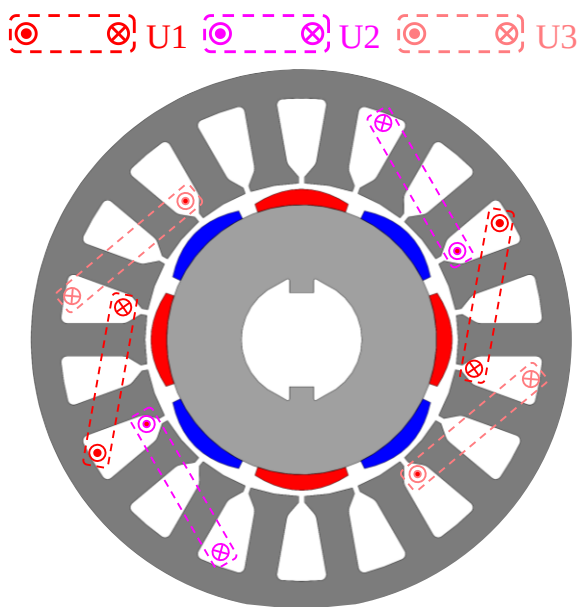


図3 提案する三重三相(多相)巻線を用いた8極18スロットSPMモータ

I は電流振幅、 θ_2, θ_3 はU2とU3電流の初期位相である。U1に対して、位相の異なる電流U2, U3を流す。すなわちU相において三相分利用する。同様にV相,W相も三重化するため、三重三相巻線と呼称される。

提案する三重三相巻線モータに電流を供給したときのギャップ磁束密度を、図2中に「8P18S(tri)」として示す。ここでは理論式を省略するが、導出した理論式に基づいて、従来の三相8P18Sが抱えていた問題を解決するような θ_2, θ_3 を選択した。図2(b)より以下の特徴が確認された。
三相8極18スロット(tri)SPMモータ(図2の緑色)

- (1) 提案モータでは、4次磁束密度を増加させ、さらなる高トルク化に寄与する。
- (2) 提案モータでは、低次の1次および2次、さらには5次磁束密度を完全にキャンセルする。これらのギャップ磁束密度の特徴から、提案モータは、「高トルク低トルクリプル化」、「低振動騒音化」の両方を達成しうる。

4. 三次元有限要素法解析を用いた提案モータの性能評価

3章で提案した三重三相巻線モータに高調波電流を重畳し、各種モータ性能を比較する。

図4に、トルクの比較を示す。提案モータ(緑色)のトルク平均値が一番大きく、さらにトルク脈動も小さい。

図5に、固定子のティースに作用する半径方向電磁加振力(ティースラジアル力)を示す。このティースラジアル力は、振動騒音の励起源であるため、小さいことが望ましい。提案モータ(緑色)では、三重三相ドライブを行うことで、広い範囲にわたり高調波が低減された。

図6に、振動騒音の結果を示す。提案モータ(緑色)では、振動および騒音が最小であった。以上より、従来、高トルク化と低振動騒音化の同時達成は困難であったが、三重三相巻線を採用し、高調波電流を重畳することで、高トルク低トルクリプル化と低振動騒音化の同時達成に成功した。

5. まとめ

従来の三相モータでは、高トルク化と低振動騒音化の同時達成は困難であった。本研究では、多相モータが冗長性の向上のみに利用されていることに留まっている点に着目し、三重三相巻線を採用し、高調波電流を重畳することで、高トルク低トルクリプル化と低振動騒音化の同時達成に成功した。この技術は、冗長性と高トルク密度化および低振動が強く要求される自動車の電動パワーステアリング用モータ、さらには、近年、盛んに研究されている航空機電動化に適用でき、一定の可能性を示唆した。

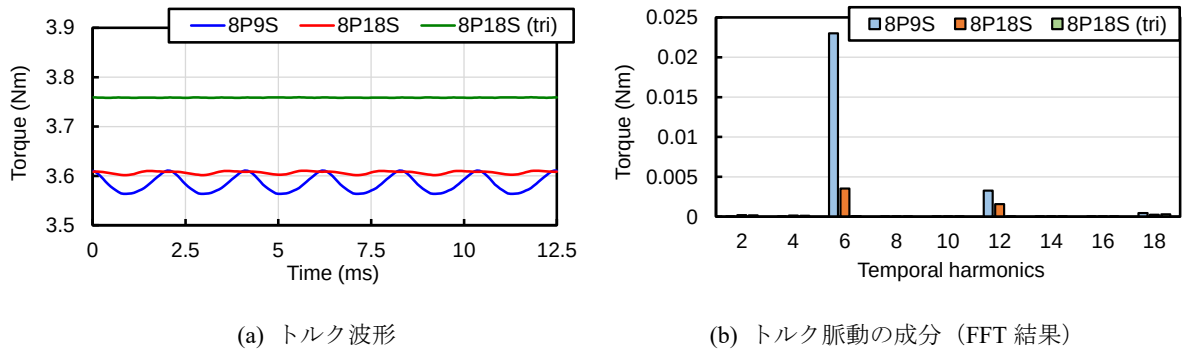


図 4 トルクの比較

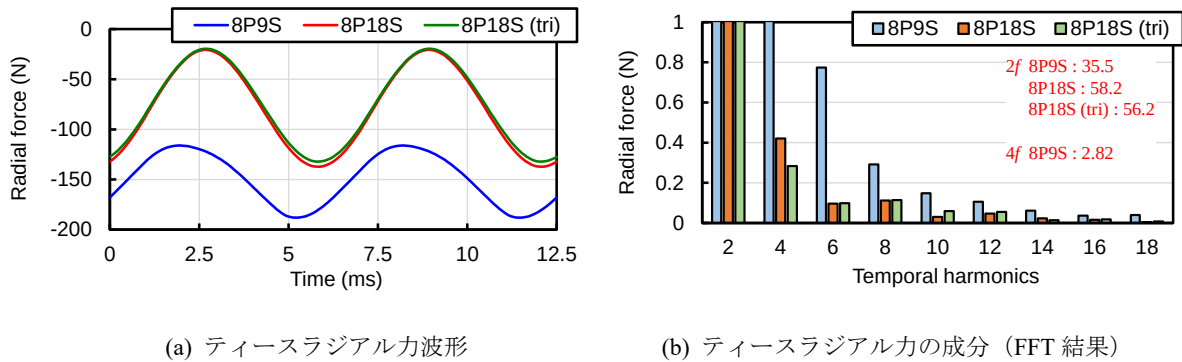


図 5 ティースラジアル力の比較

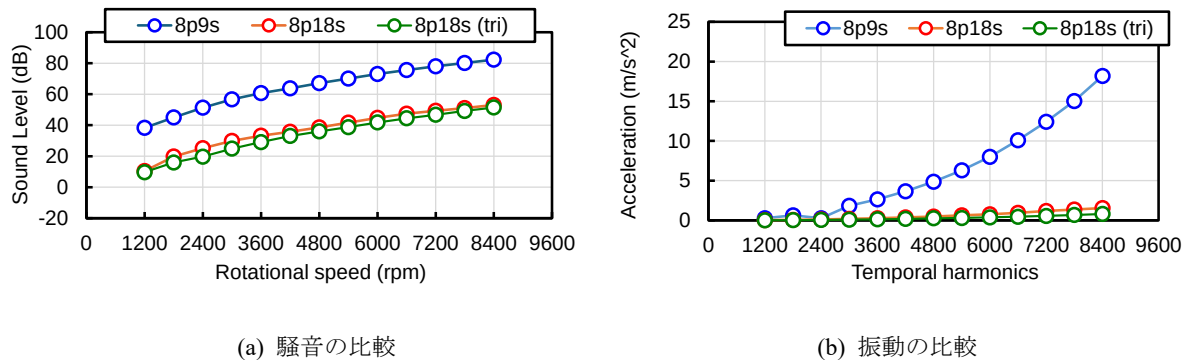


図 6 振動騒音の比較

謝辞

本研究を遂行するにあたり，公益財団法人天野工業技術研究所の研究助成金を受けて，充実した研究を実行することが出来ました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) L. Parsa and H. A. Toliyat, “Five-Phase Permanent-Magnet Motor Drives,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 1, pp. 30–37, 2005.
- 2) S. Rubino, O. Dordevic, R. Bojoi, and E. Levi, “Modular Vector Control of Multi-Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Motors,” IEEE Industrial Electronics, vol. 68, no. 10, pp. 9136–9147, 2021.