進化する電動機に対応する 電動機制御技術

電動機開発動向を踏まえた次世代電動機制御技術調査専門委員会編

目 次

1. はじめに	3	4. 電動機の低電圧大電流化に対応する制御技術	24
1.1 「電動機開発動向を踏まえた次世代電動機制御技術調査専門委員会」設置に至る経緯	3	4.1 まえがき	24
1.2 電動機の進歩がもたらしたもの	3	4.2 電動機の低電圧大電流化の動向	24
1.3 調査概要	4	4.3 低電圧大電流化の事例と課題	25
2. 制御から見た電動機	5	4.4 低電圧大電流化における制御技術	27
2.1 まえがき	5	4.5 まとめ	29
2.2 電動機モデル	5	5. 電動機の高トルク密度化に対応する制御技術	30
2.3 ベクトル制御系	7	5.1 まえがき	30
2.4 位置センサレス制御	8	5.2 トルクリップル低減技術	31
2.5 まとめ	9	5.3 磁気飽和を考慮した非線形補償技術	34
3. 電動機開発動向と制御への影響	11	5.4 位置センサレス制御における位置誤差低減技術	35
3.1 まえがき	11	5.5 まとめ	37
3.2 電動機開発動向	11	6. 電動機の高出力密度化に対応する制御技術	38
3.3 高トルク密度化	14	6.1 まえがき	38
3.4 高効率化	17	6.2 集中巻モータに対応する制御技術	38
3.5 超高速化	19	6.3 1パルス制御による高電圧印加技術	39
3.6 まとめ	22	6.4 昇圧チョッパによる高電圧印加技術	41
		6.5 高周波数制御技術	42
		6.6 まとめ	45
		7. おわりに	47

電動機開発動向を踏まえた次世代電動機制御技術 調査専門委員会委員

委員長 道木 慎二(名古屋大学)
幹事 山村 直紀(三重大学)
幹事補佐 長谷川 勝(中部大学)
委員 相場 謙一(三菱重工業(株))
石川 裕記(岐阜大学)
井手 耕三(株安川電機)
大森 洋一(東洋電機製造(株))
加納 善明(豊田工業高専)

委員 坂本 潔(株日立製作所)
佐竹 明喜(オークマ(株))
辻 峰男(長崎大学)
鳥羽 章夫(富士電機アドバンス
トテクノロジー(株))
平尾 邦朗(株明電舎)
安江 正徳(三菱電機(株))

1 はじめに

1.1 「電動機開発動向を踏まえた次世代電動機制御技術調査専門委員会」設置に至る経緯

近年の省エネルギーの取り組みは、単に既存の電動機の高効率化にとどまらず、従来、他の動力源（油圧・内燃機関等）が利用されてきた様々な分野において動力源の電動化を進めることとなった。

この流れの中で大きな役割を担いつつあるのが小形・高出力、高効率など電気機器として優れた特性を持つ、リラクタンストルクを利用する同期モータ(IPMSM, SynRM)である。

これらのモータでは、近年の磁石材料・電磁鋼板等の材料の著しい進歩、生産技術の地道な改善、そして計算機の目覚ましい高速化と磁界解析技術の発展に支えられ、用途志向での設計・開発が一般化しており、その結果、目的に合わせて最適化された多様なモータが生み出されるようになっている。

電気学会産業応用部門でも、これまでに回転機技術委員会の下で、継続的に数々の調査専門委員会^[1]が設けられてきており、これらリラクタンストルク応用電動機についての調査が行われ、先の平成 19 年度電気学会全国大会でも、「実用面から見たリラクタンストルク応用電動機の用途別最適化技術調査専門委員会」によるシンポジウム^[2]が開催され、多数の参加者と活発な質疑討論が行われた。

さて、電気機器としてきわめて高い可能性を持ち、時代の寵児となったこれらのリラクタンストルクを利用する同期モータであるが、制御系の設計者から「制御対象」として捉えた際には、従来のモータに比べ扱いにくい面を持つ。加えて、特定の用途に合わせて材料の性能を限界まで使いきって設計されている場合など、従来の通り一編の制御法ではその性能をきちんと引き出すことができない場合が増えてきている。

制御技術は、制御対象あつてのものであり、今後、一層の高性能化のみならず、適用範囲の拡大に伴い多様化を目指して研究・開発が進む同期モータを受け止め、その性能を余すところなく引き出すためには、制御技術側にも一層の発展が求められることになるであろう。

そこで、「制御系技術者の視点から電動機の開発動向をフォローしつつ、今後、求められる制御技術とはなにかを検討する必要がある」との問題意識の下、「電動機開発動向を踏まえた次世代電動機制御技術調査専門委員会」（平成 17 年 10 月～平成 19 年 9 月）が設置され、電動機、主にリラクタンストルクを利用する同期モータの開発動向、適用範囲の拡大、それらを踏まえて、既存の制御技術の見直しと新しい制御技術の動向についての調査を実施することとなった。

1.2 電動機の進歩がもたらしたものの

1.2.1 電動機の視点から まず、近年の同期モータの進歩について、電動機の視点で振り返る。忘れてはならないのが以下に示す要素技術の進歩である。

- ・ 材料：従来に比べはるかに高い磁束密度での動作を可能とした磁石・電磁鋼板の進歩
- ・ 加工：複雑なロータ・ステータ形状を可能とするプレス技術
- ・ 設計：計算機の高性能化を伴う磁界解析技術の高度化・高精度化

これらを受け、磁石埋込形ロータ、集中巻ステータをはじめとする様々な技術が実用化されていった。その結果、同期モータに様々な特徴をもたらすことになるが、ここでは以下の特徴に注目する。

- ・ 磁氣的異方性(突極性)によるリラクタンストルクの有効活用
- ・ 磁界解析を利用した高効率、小形・高出力化の限界設計

これらの特徴は、用途に合わせて最適設計された(用途指向型)同期モータの普及を促進させ、結果的に高性能化と適用範囲の拡大を可能としたといえる。

1.2.2 制御技術の視点から 次に、前節で述べた同期モータの特徴を制御技術の視点で振り返ってみる。

- ・ 磁氣的異方性(突極性)によるリラクタンストルクの有効活用

磁氣的異方性の導入は、数式モデルの複雑化を招くことになった。これは、制御用モデルが複雑化することにより、制御、特にセンサレス制御の複雑化を招いた。拡張誘起電圧モデルの登場などにより、ある程度の取り扱い易さを得たが、本質的には制御系設計が難しくなったといえる。

一方で、磁氣的異方性は誘起電圧の検出できない停止・低速時における位置推定の可能性をもたらし、これに着目したセンサレス制御の研究が精力的にすすめられている。

- ・ 磁界解析を利用した高効率、小形・高出力化の限界設計
磁気飽和、すなわちパラメータ変動を前提と考える必要が生じている。モデルを利用する制御手法にとってこれは大変厄介な問題となる。また、磁気飽和は高調波成分を発生し、特に集中巻ステータの場合、(d-q 軸上)6 倍高調波の発生が様々な問題をもたらしている。

つまり、「電動機としての高性能化」をもたらした上記の特徴は、多くの点で「制御対象としての劣化」を招いたと