

集中巻独立二重三相 PMSM を用いた 6 次ラジアル力と 6 次トルクリプルの抑制

◎添田 拓巳 芳賀 仁

長岡技術科学大学 工学部 5 年一貫制博士課程 技術科学イノベーション専攻

tsoeda@stn.nagaokaut.ac.jp | hagah@vos.nagaokaut.ac.jp

1. はじめに

近年、集中巻の巻線構造を持つ永久磁石同期モータ (Permanent Magnet Synchronous Motor: PMSM) は、電動パワーステアリングなど様々な機器に使用されている。PMSM の使用により省エネ性は改善されるが、振動、騒音が課題である。これらの振動や音ノイズは、使用者に不快感を引き起こすため抑制が求められる。集中巻 PMSM が引き起こす振動の原因は主に 2 種類ある。ひとつは、電気角周波数の 6 の整数倍(6,12,18, ...)に発生するトルクリプルである⁽¹⁾。もうひとつは、磁石と巻線によって径方向(ラジアル方向)に発生する電磁加振力(ラジアル力)である⁽²⁾。特に、集中巻 PMSM において、電気角 6 次調波のラジアル力が発生した場合、その固有モードは円環 0 次の振動となり、騒音となりやすいことが知られている⁽³⁾。しかし、文献(1)や(2)などの先行研究では、トルクリプルの抑制やラジアル力の抑制が行なわれているが、これらを同時に抑制することは困難である⁽²⁾。そこで本稿では、構造的に電気角 6 次のトルクリプルを抑制できる独立二重三相 PMSM に着目して、電気角 6 次トルクリプルの抑制を検討する。提案制御法はモータの相電流に 5 次と 7 次の高調波電流を重畳することにより電気角 6 次ラジアル力の抑制を狙う。提案法の有効性はシミュレーションで確認したため報告する。

2. ラジアル力およびトルクリプル抑制方法

文献(2)(3)では、通常の三相巻線構造を持つ集中巻 PMSM に対して、d 軸もしくは q 軸電流に電気角 6 次高調波成分を重畳することで電気角 6 次ラジアル力の抑制を行なっている。本稿で着目する独立二重三相 PMSM でも同様に、それぞれの三相巻線セット A, B に d 軸電流高調波を与えることを考える。Fig. 1 に本稿で想定する独立二重三相モータの巻線構造を示す。巻線セット A の各相を U, V, W 相、巻線セット B の各相を X, Y, Z 相と定義し、U 相と X 相は隣り合うティースに巻かれている。10 極 12 スロット(10P12S)モータの場合、U 相と X 相間のティースは機械角で 30 度のずれを有することとなる。そして、10 極モータであることから、電気角で 150 度の巻線ずれを持つこととなる。ここで、機械角で 30 度の巻線ずれを持つ独立二重三相モータは、極対数が奇数の場合に電気角 6 次トルクリプルが打ち消し合い、偶数の場合には強

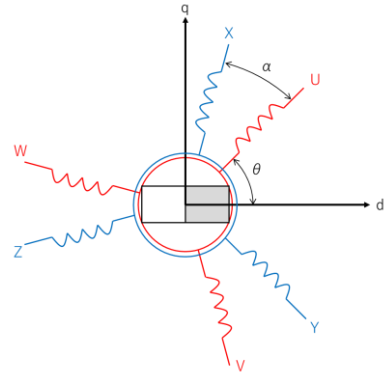


Fig. 1 Winding arrangement of double-winding PMSM

め合うことに留意が必要である。

d 軸高調波電流を重畳した dq 軸電流指令値 I_{dq} を式(1)とする。ここで、 I_{d6} は重畳する電気角 6 次高調波電流の振幅、 θ は磁極位置、 θ_{d6} は重畳する高調波電流の位相である。 I_{q0} は q 軸電流指令値であり、速度やトルク指令によって変動する値である。式(1)を座標変換し、U 相の電流指令値と U 相から α [deg] の巻線ずれ(電気角)を持つ X 相の電流指令値についてのみ取り出すと式(2),(3)となる。

$$I_{dq} = \begin{bmatrix} i_{d6} \\ I_{q0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{d6} \cos(6\theta + \theta_{d6}) \\ I_{q0} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$i_U = \sqrt{\frac{2}{3}} \left\{ A \sin(\theta) + \frac{I_{d6}}{2} \cos(7\theta - \theta_{d6}) + \frac{I_{d6}}{2} \cos(5\theta - \theta_{d6}) \right\} \quad (2)$$

$$i_X = \sqrt{\frac{2}{3}} \left\{ A \sin(\theta + \alpha) + \frac{I_{d6}}{2} \cos(7\theta - \theta_{d6} + 7\alpha) + \frac{I_{d6}}{2} \cos(5\theta - \theta_{d6} + 5\alpha) \right\} \quad (3)$$

V, W 相, Y, Z 相については対称性を持つため省略する。

本稿では、巻線ずれを有する独立二重三相モータに対して、式(2),(3)で示すような相電流を与えることで、電気角 6 次ラジアル力抑制が可能となる。さらに、その巻線ずれ構造から、電気角 6 次トルクリプルを抑制する。

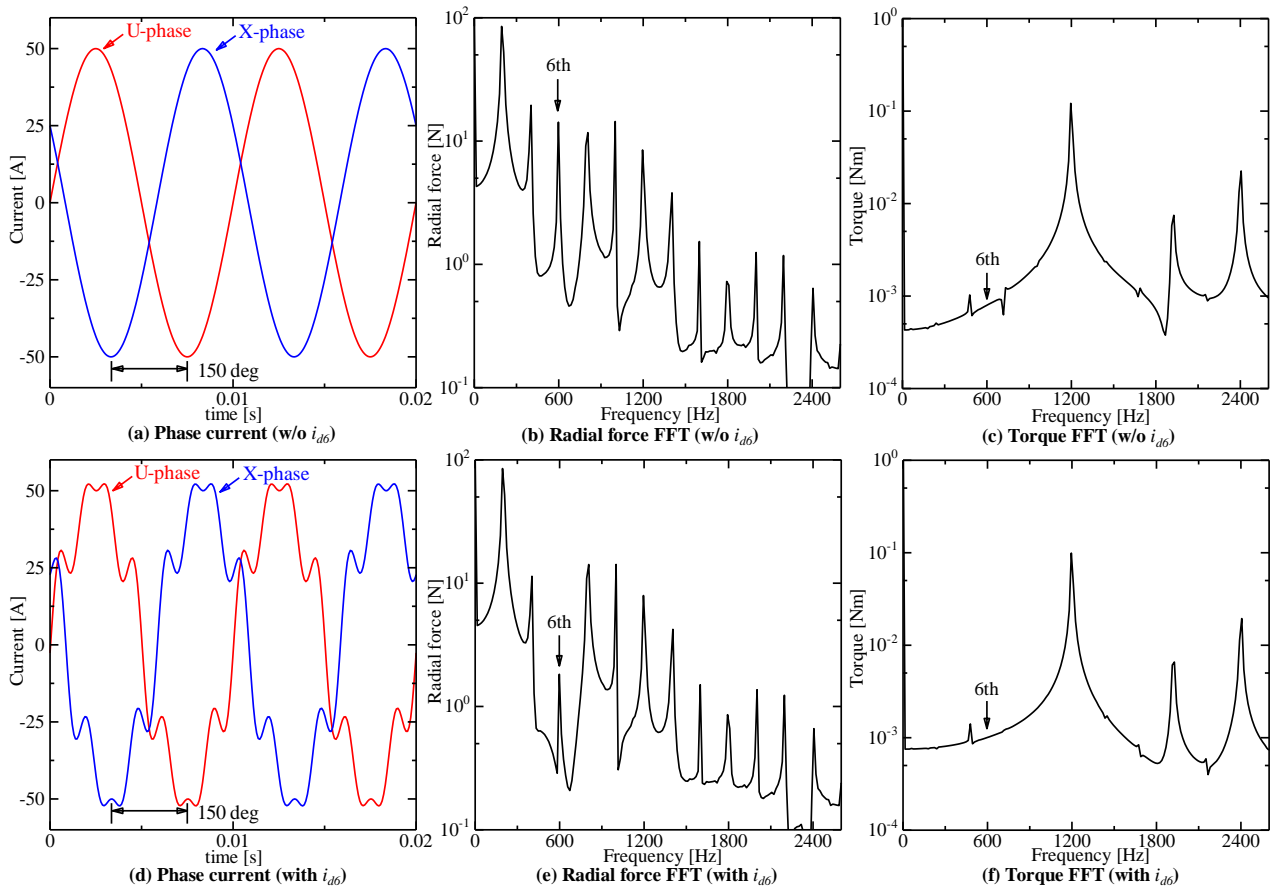


Fig. 2 Simulation results

3. シミュレーションによる検討

シミュレーションは JMAG を使用する。ラジアル力の測定点は、U 相ティースの先端中央部とした。本稿では、10P12S の機械角 30 度の巻線ずれを有する集中巻独立二重三相 PMSM を対象とした。理想状態でのシミュレーションを行ない巻線同士の干渉を極力無視するために、対象のモータを機械速度 1200 rpm で一定速回転を与え、理想電流源で高調波成分を意図的に含む電流を与えることでシミュレーションを行なった。抑制効果の評価として、電気角 6 次高調波電流の有無で 2 通りのシミュレーションを行ない、その際に発生するラジアル力、トルクの高調波解析によって比較する。

Fig. 2 にシミュレーション結果を示す。(b),(e) は発生するラジアル力の高調波解析結果を示す。電気角 6 次に相当する 600 Hz のラジアル力成分が 14.2 N(w/o i_{d6}) から 1.82 N(with i_{d6}) となり 87% の低減を確認した。(c),(f) は、トルクの高調波解析結果を示す。同様に 600 Hz の成分に着目すると、巻線ずれ構造により打ち消し合うため、ほとんど発生していないことがわかる。 7.9×10^{-4} Nm(w/o i_{d6})、 10.0×10^{-4} Nm(with i_{d6}) となった。これは、それぞれのトルクの 0 次成分である 5.05 Nm(w/o i_{d6})、4.97 Nm(with i_{d6}) に対していずれも 0.02% 程度と微小である。

以上より、高調波電流の重畳により電気角 6 次ラジアル力成分の抑制が達成されていることがわかる。また、トルクリプルの電気角 6 次成分に関しては、巻線ずれを有する二重巻線構造により打ち消し合うことで抑制できている。

4. まとめ

本稿では、独立二重三相 PMSM にラジアル力抑制のための高調波電流を重畳することで、構造によって電気角 6 次トルクリプルを、抑制制御によって電気角 6 次ラジアル力の抑制が行えることをシミュレーションで検討した。電気角 6 次ラジアル力は、高調波電流重畳により 14.2 N(w/o i_{d6}) から 1.82 N(with i_{d6}) となり 87% の低減を確認した。電気角 6 次トルクリプルは、 7.9×10^{-4} Nm(w/o i_{d6})、 10.0×10^{-4} Nm(with i_{d6}) となり、トルク 0 次成分と比較して 0.02% 程度と微小であることから、構造によって抑制がされているといえる。

文 献

- (1) 川井, 芳賀, 近藤: 電学論 D Vol.134 No.2 pp.127-138
- (2) 綿引, 森, 蘭, 田中, 上田, 福村, 兼松, 藤本: 電学論 D Vol.139 No.8 pp.708-716
- (3) 兼松, 宮島, 藤本, 堀, 榎本, 金堂, 小宮, 吉本, 宮川: 電気学会産業応用部門大会 VT-13-018 pp.19-24(2013)