

FOC 系统的实时 dq0 分析

Bharghavi Vempati

泰克科技公司软件设计工程师

泰克科技印度有限公司

印度班加罗尔

vempati.bharghavi@tektronix.com

Niranjan Hegde

泰克科技公司软件设计工程师

泰克科技印度有限公司

印度班加罗尔

niranjan.hegde@tektronix.com

Srikrishna NH

泰克科技公司高级技术专家

泰克科技印度有限公司

印度班加罗尔

krishna.n.h.sri@tektronix.com

摘要 – 目前，设计人员使用定制的嵌入式控制软件和额外的采用 FPGA 实现磁场定向控制 (FOC) 的硬件来测量直接正交零点 (dq0)。这是一项复杂而又成本很高的任务，要求在控制器电路板上具备可接入的探测点，可能极具挑战性 [3]。

本文讨论了马达设计人员可以怎样在传感器系统和无传感器系统中测量 dq0 分量及合成驱动矢量。我们应用 Clarke 和 Park 变换来关联控制器电路行为。设计人员能够可视化使用 D 和 Q 分量为给定电输入生成的最优扭矩。它还会表明马达的效率。通过示波器的光标功能，dq0 可以看作采样率下的旋转坐标系。

对无传感器系统，可以使用滤波后的电信号精确计算角度。dq0 信号用来改进控制器算法。相量图会同时显示定子和转子矢量。

I. 引言

三相 AC 和 DC 机械的行为可以用下面的旋转电压和电流公式建模，其中 R、S 和 T 是三相 AC 信号，Vg 是对应增益，‘ ω ’ 等于 $2 * \pi * f$ ，其中 ‘f’ 是标称频率 [11]。

$$VR = Vg * \cos(\omega t) \quad (1)$$

$$VS = Vg * \cos(\omega t - 2\pi/3) \quad (2)$$

$$VT = Vg * \cos(\omega t - 4\pi/3) \quad (3)$$

R-S-T AC 信号是相位的 120 度输出。dq0 旋转参考帧，把 AC 时间变化信号转化成 DC 时间不变信号 [9]。这样就可以在执行逆变换，恢复实际三相 AC 结果前，以简化方式计算 DC 信号 [12]。我们使用 Clarke 和 Park 综合变换，把三相 R-S-T 波形转化成 dq0 波形 [9]。R 相位与 d 轴对准，应用下面的矩阵公式 [10,13]。

$$\begin{bmatrix} d(t) \\ q(t) \\ 0(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(t) \\ S(t) \\ T(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 R、S 和 T 可以取 $I_{R,S,T}(t)$ 或 $V_{RN,SN,TN}(t)$ 。t 是采样时间，从 0 开始到采集的时间周期。 θ 是电气角，用马达的正交编码器接口 (QEI) 输出确定。

dq0 是旋转的参照坐标系，相对于转子位置表示系统。在任意时点，d 轴都沿着转子的南北轴，表示转子通量方向。

q 轴是 d 轴超前 90 度。由于定子和转子的垂直磁通量产生扭矩，所以最好让定子和转子通量在 90 度角，也就是说，最好让定子通量或得到的定子电流沿着 q 轴。d 表示转子通量轴，q 表示扭矩轴。磁场定向控制 (FOC) 的目标是控制 d-q 值，实现要求的扭矩。通过独立控制 d 和 q，可望实现最大每安培转矩比 (MPTA)。[1,7]

II. 磁场定向控制

与梯形或正弦波转换方法相比，FOC 是当前推荐的马达控制技术。在这种方法中，三相 R-S-T 波形转化成 dq0。Clarke 变换把三相轴系统转换成 α 和 β 组成的二轴系统。Park 变换把固定的 α 和 β 轴转换成旋转的 d 和 q 轴 [1]。得到的电流是两个 DC 波形之和，称为 d 和 q 分量。q 分量显示电流转换为扭矩的部分。因此，沿着 d 轴的电流部分不会转换成能用的机械能。

在控制模块中，d 和 q 分量与希望的 d ref 和 q ref 分量进行对比，如图 1 所示。对永磁转子，d ref 值为 0，q ref 是希望的马达扭矩。误差值设置到 PI 控制器，如图 1 所示。这会调节马达电流，这样马达就会在变动负荷下以稳定状态运行。

通过逆 Park 变换，PI 控制器的输出作为空间矢量 PWM (SVPWM) 模块的输入，得到三相 PWM 信号，三相 PWM 信号馈送到马达 [2,3]。SVM 模块有逆变器子区，它由 6 个半桥 MOSFETS 组成，用来在 8 个不同区域之间切换，生成三相 PWM 信号。参考矢量幅度 (Vref)，得到的 α 和 β 用来调制逆变器输出。SVM 技术的目标是生成三相 PWM 信号，其结果等于参考电压矢量 Vref [4,5]。

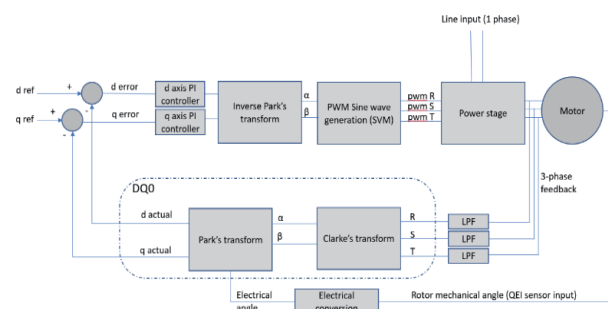


图 1. BLDC 马达的磁场定向控制系统 (FOC)。

III. 编码器 θ 积分

来自传感器数据的转子角坐标整合进 dq0 的测量，传感器数据使用 QE1 编码器，带有指引脉冲输出。这个机械角用公式 (5) 中的每转脉冲数 (PPR) 转化成电气角 θ 。指引脉冲 (Z) 上升沿视为转子磁铁的 0 度位置，其中 d 轴与 R 轴对准。偏置角 (Z 与参考电压或电流波形之间的相位差) 中增加的增量角 (5) 作为 (4) 中矩阵公式的 θ 使用。

增量角 (θ ，单位：度) 为：

$$angle = \frac{360}{(4 * PPR)} \quad (5)$$

得到的矢量用下面的公式计算得出：

$$R(t) = \sqrt{d(t)^2 + q(t)^2} \quad (6)$$

图 2 所示的得到的矢量等于 FOC 系统中的 Vref。

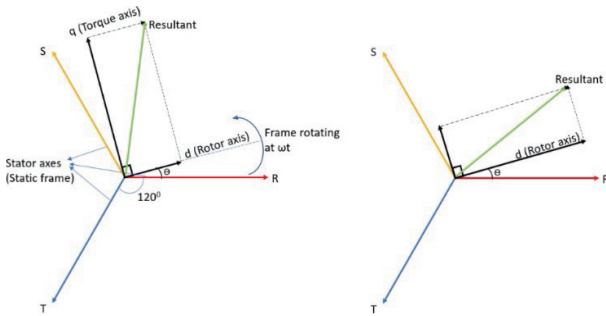


图 2a. 高扭矩的马达 ($q \gg d$)。

图 2b. 低扭矩的马达 ($d > q$)。

图 2b 中显示的相对于 d 的低值 q，也会发生在编码器位置未与相位 A 的通量精确对准。示波器软件提供了一个条款，可以输入电气偏置角，补偿传感器安装或滤波器应用产生的偏置。软件低通滤波器 (LPF) 应用到三相波形上，减缓高频失真、电压尖峰、高频纹波及信号路径中 EMI 干扰的影响。图 3 显示了在应用 LPF 时及没有应用 LPF 时的相量图。无传感器系统可以使用偏置角和 LPF，获得正确校准的 dq 帧。

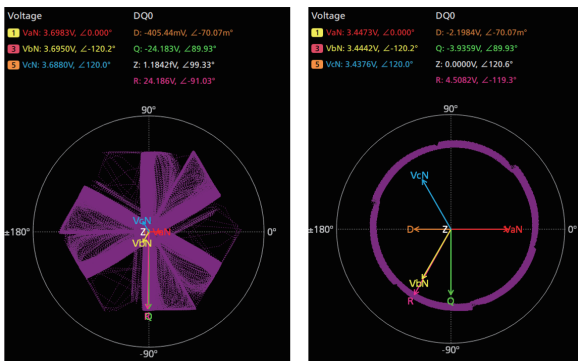


图 3a. 没有应用滤波时的相量图。

图 3b. 应用滤波时的相量图。

通过从 d 和 q 中计算出斜边矢量，如图 4 所示，软件计算出得到的驱动矢量 (6)。这有助于了解是什么驱动电流，识别是否有任何波形不理想的位置。R 从 0 度开始，与 QE1

指引 Z 脉冲对准。如图 4 所示，得到的紫色圆指明了马达的旋转稳定性，有失真时会显示失真。这会得到动态驱动廓线，帮助与 d-q 平面中的 Vref 关联起来 [4]。注意 D、Q 和 Z 矢量是瞬时的，表示放置示波器光标 A 的时点。

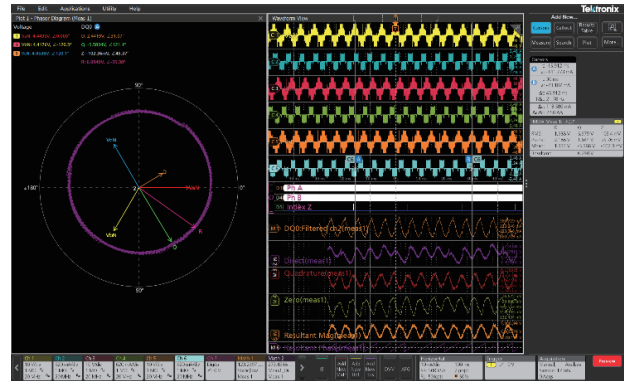


图 4. 得到的驱动图及 dq0 变换后的波形。

IV. 结论和未来工作

通过查看图形 Resultant 结果图，基于示波器的 dq0 图有助于确定马达旋转状况。马达设计人员可以观察马达旋转、纹波和谐波分量的一致性，这在电动汽车之类的应用中至关重要 [6]。q 矢量相对于 d 矢量的值越高，表明扭矩值也就越高。由于 R-S-T AC 波形转化成 dq0 DC 波形，所以分析马达行为更加简便。同时表示 R-S-T 和 dq0 值可以帮助设计人员与得到结果值关联起来，类似于馈送到 SVM 模块中的 Vref。

将来，可以显示 SVM 开关状态的星座图，可以使用分解器、正弦余弦编码器和霍尔传感器，计算出 θ 。

参考资料

- [1] Anders Kronberg, "Design and Simulation of Field Oriented Control and Direct Torque Control for a Permanent Magnet Synchronous Motor with Positive Saliency" (正显著性永磁同步马达磁场定向控制和直接扭矩控制的设计和仿真), Uppsala universitet, ISRN UTH-INGUTB-EX-E-2012/05-SE, Chapters 3, 4 and 5.
- [2] Ó. Lopez, J. Alvarez, J. Doval-Gandoy and F. D. Freijedo, "Multilevel Multiphase Space Vector PWM Algorithm" (多级多相位空间矢量 PWM 算法), in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 5, pp. 1933-1942, May 2008.
- [3] G. Renukadevi, K. Rajambal, "FPGA Implementation of SVPWM Technique for Seven-Phase VSI" (七相位 VSI 的 SVPWM 技术的 FPGA 实现), International Journal of Electronics and Electrical Engineering, pp. 275, 2013.
- [4] Ms. Priya Subhash Raichurkar, Mr. Asif Liyakat Jamadar, "V/F Speed Control of 3 phase Induction Motor using Space Vector Modulation" (使用空间矢量调制对三相感应马达进行 V/F 速度控制), International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181, Vol. 4 Issue 05, May-2015.
- [5] Hyung-Min Ryu, Jang-Hwan Kim and Seung-Ki Sul, "Analysis of multiphase space vector pulse-width modulation based on multiple dq spaces concept" (根据多个 dq 空间概念分析多相空间矢量脉宽调制), IEEE Trans. Power Electron., vol. 20, no. 6, pp. 1364-1371, Nov. 2005.

- [6] Ramin Salehi Arashloo, Jose Luis Romeral Martinez, Mehdi Salehifar, Manuel Moreno-Eguilaz, "Genetic algorithm-based output power optimisation of fault tolerant five-phase brushless direct current drives applicable for electrical and hybrid electrical vehicles" (电动汽车和混合动力汽车使用的容错五相无刷直流驱动基于遗传算法的输出功率优化), *Electric Power Applications IET*, vol. 8, no. 7, pp. 267–277, 2014.
- [7] A. Khazaei, H. A. Zarchi, G. A. Markadeh and H. Mosaddegh Hesar, "MTPA Strategy for Direct Torque Control of Brushless DC Motor Drive" (无刷 DC 马达驱动直接扭矩控制的 MTPA 策略), in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 8, pp. 6692–6700, Aug. 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.3009576.
- [8] Y. Levron and J. Belikov, "Open-source software for modeling and analysis of power networks in the dq0 reference frame" (建模和分析 dq0 参考系中电力网络的开源软件), *The 12th IEEE PES PowerTech Conference*, Manchester, UK, pp. 1–6, 2017.
- [9] O'Rourke, Colm J. et al. "A Geometric Interpretation of Reference Frames and Transformations: dq0, Clarke, and Park" (参考系和变换的几何解释: dq0, Clarke 和 Park). *IEEE Transactions on Energy Conversion* 34, 4 (December 2019): 2070 – 2083.
- [10] P. C. Krause and C. Thomas, "Simulation of symmetrical induction machinery" (对称感应式机构的仿真), *IEEE transactions on power apparatus and systems*, vol. 84, no. 11, pp. 1038–1053, 1965.
- [11] B. K. Bose, *Modern power electronics and AC drives* (现代功率电子和 AC 驱动). Prentice Hall, 2002.
- [12] Juri Belikov, Yoash Levron, "Dynamic modeling and stability analysis of power networks using dq0 transformations with a unified reference frame" (使用 dq0 变换及统一参考系对电力网络进行动态建模和稳定性分析), *Estonian Academy of Sciences*, 2018, 67, 4, 368–377.
- [13] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, and S. D. Umans, "Electric machinery" (电动机械), McGraw-Hill New York, 2003, vol. 5.

本文于 2022 年 3 月 20 日发表于 2022 年 IEEE 应用功率电子大会和产品博览会 (APEC)。

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9773751>

DOI: 10.1109/APEC43599.2022.9773751

©2022 IEEE. 允许以个人目的使用本材料。如非个人目的, 在任何当前或未来媒体中使用本材料时必须获得 IEEE 允许, 包括为广告或促销目的重印 / 重新出版本材料, 制作新的合集作品, 转售或再分发到服务器或列表, 或在其他作品中重用本文中任何受版权保护的内容。