

电网电压矢量定向的三相异步电机同步切换控制策略

徐友^{1,2}, 刘永超³, 郑建勇¹, 华伟⁴

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 南京农业大学 工学院, 江苏 南京 210031;
3. 重庆电力设计院, 重庆 401147; 4. 苏州自来水公司, 江苏 苏州 215002)

摘要: 鉴于大容量三相交流异步电机在进行变频-工频切换瞬间存在较大的电网冲击电流, 提出一种基于电网电压矢量定向的同步切换控制策略, 并采用电力电子开关与交流接触器并联的电路拓扑实现电机变频-工频的同步切换。该控制策略在电网电压同步坐标系下检测到变频器输出电压空间矢量的相位为 30° 电角度时触发电力电子开关和交流接触器进行同步切换。实验结果表明该控制策略可精确捕获电机同步切换的最佳时刻实现零相位误差切换, 电力电子开关可大幅缩短切换时间, 提高了切换控制精度和系统对不同电机及负载的适应性。

关键词: 异步电机; 电网电压矢量定向; 变频-工频同步切换; 电力电子开关; 电网电压同步坐标系; 切换
中图分类号: TM 464 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.04.015

0 引言

大中城市自来水厂和污水处理厂的提升泵房通常配有 3 台以上大功率水泵, 其中仅 1~2 台配置变频装置, 每台水泵电机功率通常在 500 kW (有的甚至在 2 000 kW) 以上。根据使用要求, 提升泵组有时需要 2~3 台水泵同时工作。变频装置控制水泵缓慢 (软) 启动, 电机启动电流较小 (通常为稳态电流的 2~3 倍), 机械冲击小, 而如果是直接合闸的硬启动, 其启动瞬时电流通常为稳速电流的 10 倍以上, 因此大功率水泵硬启动不仅机械冲击大、易磨损, 而且对局部电网会产生较大的冲击, 影响附近用电设备正常运行和局部电力供应安全。

泵房仅配置 1 台变频器, 只能对 1 台水泵进行变频控制。当需要 2 台及以上水泵同时工作时, 变频器先变频启动一台水泵, 当水泵电机启动至额定转速时切换至电网供电, 变频器再对下一台水泵电机进行变频软启动^[1]。如果采取直接切换或是异步切换^[2-3], 会对电网产生较大的电流冲击, 因此必须检测变频器输出电压和电网电压相位实现电机的变频-工频同步切换^[2-3], 克服大功率水泵变频-工频直接切换或是异步切换带来的机械冲击大、易磨损以及对局部电网产生瞬时冲击的弊端。

因此, 开展大容量三相异步电机的变频-工频切换的控制策略和电路拓扑对实现电机软启动和平稳切换、减小电网冲击电流、抑制电机转矩突变和提高电机使用寿命具有积极意义。国内外相关专家及业内人士对此展开了大量的分析和研究。

文献[4-12]采用锁相环技术控制变频器输出电

压和电网电压的某一相或某一线电压同步实现大功率电机变频-工频的平稳切换; 文献[13]采用鉴相鉴频器实现大功率电机变频-工频的平稳切换。根据锁相环工作原理, 锁相环稳定运行时无频率差, 但是存在一定的相位误差, 因此基于锁相环技术的电机切换控制器难以实现零相位差切换; 在电网电压不是严格对称或电网电压波形发生畸变的工况下, 变频器输出电压和电网电压的某一相或某一线电压同相难以确保电机切换时变频器电压和电网电压在空间上保持相位一致, 进而无法实现真正意义上的同步切换; 同时, 针对目前普遍采用的交流接触器存在开关延时较大的问题, 必须重新考虑并设计新型的切换开关以减小切换延时, 以最大限度地减小电机切换时对电网的冲击电流。

鉴于以上分析, 本文提出一种基于电网电压空间矢量定向的电机变频-工频同步切换的控制策略, 并给出在电网电压矢量同步坐标系下检测变频器电压相位的方法, 可以精确捕获变频器电压矢量与电网电压矢量在空间上相位相同的时刻, 提高同步精度, 最大限度地降低变频-工频切换对电网的电流冲击; 并且提出采用电力电子开关与交流接触器并联工作的新思路, 可解决交流接触器开关延时对切换控制精度的影响; 最后设计了基于 DSP 控制的电机变频-工频同步切换的实验系统。实验结果证明了理论分析和研究的正确性和有效性。

1 三相异步电机定子瞬间断电暂态分析

三相异步电机定子瞬间断电时, 定子电流和电磁转矩立即变为 0, 转子则成为无源闭合电路, 根据断电瞬间转子磁链不能突变的原则, 由于定子开路无法励磁, 因此转子中立即产生励磁电流, 在定子断电后电机内电枢反应停止, 转子电流成为自由分量,

从断电瞬间的初值按转子时间常数以指数规律衰减。

设定子在 t_1 时刻断电,定子电流 $i_x=0$ ($X=A, B, C$),转子的三相电压方程为:

$$R_r i_x + L_r \frac{di_x}{dt} = 0 \quad x=a, b, c \quad (1)$$

其中, R_r 为转子每相电阻, L_r 为计及相邻两相的互感作用后的感应电机转子每相总自感。

根据式(1)可知转子三相电流为:

$$i_x = I_x e^{-(t-t_1)/\tau_r} \quad (2)$$

其中, τ_r 为转子回路的时间常数, $\tau_r = L_r / R_r$; I_x 为转子各相电流初值。

定子断电后电磁转矩变为 0,则电机的转速在负载转矩的作用下逐渐降低,其机械角速度 Ω_r 以指数规律降低^[14]。

转子中的直流分量将在定子绕组中产生一角频率为 ω_r 的感应电动势,则:

$$\omega_r = p\Omega_r \quad (3)$$

其中, p 为电机的极对数。

因此定子端的感应电势的频率同样以指数规律降低。

根据以上分析,电机定子断电后,由于转子中的励磁电流呈指数形式衰减,转子磁链的幅值也以指数规律衰减;转子的机械角速度呈指数规律衰减,感应电势的频率也以指数规律衰减,感应电势的波形也并非正弦波,且随时间推移发生较大的畸变。

当电机重新投入电网时,在电网电压与感应电势的共同作用下,将对电网产生一定的冲击,其大小取决于电机重新投入电网时电网电压与电机定子侧感应电势的相位差。因此为减小电机变频-工频切换对电网的电流冲击,在切换时要遵循以下 2 个原则:电机在切换至电网前,变频器输出电压应与电网电压相位保持一致^[14];因电机定子断电后,感应电势的幅值、频率、相位相对于电网电压迅速衰减,波形也会发生畸变,应尽可能缩短切换时开关动作的延迟时间。

2 电网电压定向的变频器输出电压相位同步检测方法

根据电机学理论,变频器输出电压空间矢量与电网电压空间矢量同相时,电机切换对电网产生的冲击电流最小,而在电网并非严格对称时,仅是两者的某一相电压同步或是某一线电压同步并不等价于两者电压空间矢量同步,此时切换无法将电网的冲击电流降至最低。本文采用电网电压矢量定向的方式捕捉变频器输出电压空间矢量与电网电压空间矢量相位相同的时刻,以获得最佳切换时刻,实现同

步切换。

三相电压可以用一个旋转矢量在相隔 120° 的 3 根时间轴上的投影表示,这个可同时表示三相的电压量的旋转矢量称为电网电压矢量^[15]。设电网三相电压为:

$$\begin{cases} e_a = E_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \\ e_b = E_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0 - 120^\circ) \\ e_c = E_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + 120^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

其中, E_m 为电网相电压幅值, ω_0 为电网电压角频率, φ_0 为电网 A 相相电压初始相位。

引入旋转算子 $a = e^{j120^\circ}$,则电网电压的综合矢量为:

$$E = \frac{2}{3} (e_a + ae_b + a^2 e_c) = E_m e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)} \quad (5)$$

根据式(5)可知电网电压矢量的瞬时相位为:

$$\varphi_0(t) = \omega_0 t + \varphi_0 \quad (6)$$

将电网三相电压变换到以电网电压矢量的瞬时相位定向的同步旋转坐标系(dq 坐标系),可得:

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} T_{abc/dq} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

$T_{abc/dq} =$

$$\begin{bmatrix} \cos \varphi_0(t) & \cos[\varphi_0(t) - 120^\circ] & \cos[\varphi_0(t) + 120^\circ] \\ -\sin \varphi_0(t) & -\sin[\varphi_0(t) - 120^\circ] & -\sin[\varphi_0(t) + 120^\circ] \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $T_{abc/dq}$ 为电网电压矢量定向的同步旋转变换矩阵。

根据式(7)可以得出变频器输出线电压在 dq 同步旋转坐标系下的直轴分量 u_d 和交轴分量 u_q :

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} T_{abc/dq} \begin{bmatrix} u_{ab} \\ u_{bc} \\ u_{ca} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, u_{ab}, u_{bc}, u_{ca} 为变频器输出线电压,则变频器输出线电压空间矢量为:

$$U = u_d + j u_q \quad (10)$$

电网电压和变频器电压的矢量关系如图 1 所示(图中将 C 轴缩短表示)。

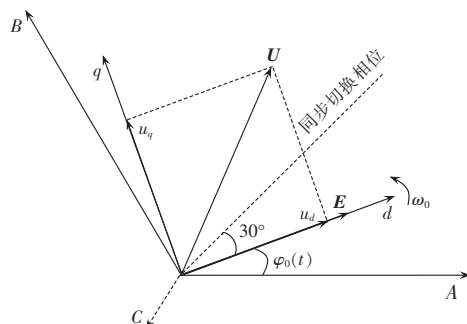


图 1 电网电压和变频器电压矢量图

Fig.1 Space vectors of grid-voltage and transducer-voltage

切换控制系统采集变频器的线电压,由于线电压超前相电压 30° 电角度,因此切换时变频器电压矢量应在 dq 坐标系下处于 30° 位置,如图 1 中虚线位置,通过变频器输出电压的直轴分量 u_d 和交轴分量 u_q 判断变频器电压矢量是否位于图 1 中虚线位置,进而判断变频器电压和电网电压是否同相,即:

$$\frac{u_q}{u_d} = \cot 30^\circ = \sqrt{3} \quad (11)$$

在工程上,由于存在数据采集误差和 DSP 有限精度的限制,式(11)可表示为:

$$\frac{u_q}{u_d} \approx 1.732 \quad (12)$$

3 电网电压定向的同步切换控制系统

电机变频-工频同步切换控制系统如图 2 所示,其中 KM_1 、 KM_3 分别是电网侧和变频器侧的交流接触器, KM_2 、 KM_4 分别是电网侧和变频器侧的电力电子开关, KM_1 、 KM_2 并联连接, KM_3 、 KM_4 并联连接;系统分别采用 3 个霍尔电压传感器采集电网侧相电压 e_a 、 e_b 、 e_c 和 2 个霍尔电压传感器采集变频器侧的线电压 u_{ab} 、 u_{bc} ,并对变频器侧的线电压 u_{ab} 、 u_{bc} 进行低通滤波处理,其中:

$$u_{ca} = -u_{ab} - u_{bc} \quad (13)$$

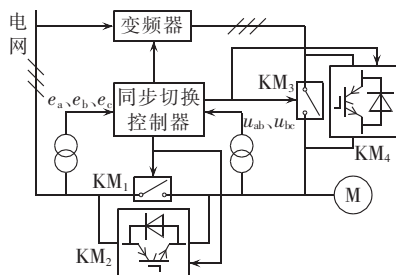


图 2 电机同步切换控制系统

Fig.2 Control system of motor synchronous switching

根据电网侧霍尔电压传感器测得的电网三相电压 e_a 、 e_b 、 e_c ,并由式(5)计算得到电网电压空间矢量 $\mathbf{E}$,由于 $\mathbf{E}$ 是一复数,可根据其实部和虚部计算得出电网空间电压矢量 $\mathbf{E}$ 的瞬时相位 $\varphi_0(t)$,即式(6);再根据布置在变频器侧的霍尔电压传感器测得变频器输出的线电压 u_{ab} 、 u_{bc} 、 u_{ca} ,并由式(9)即可计算得到变频器空间线电压矢量在以电网电压矢量定向的 dq 同步旋转坐标系下的直轴分量 u_d 和交轴分量 u_q 。为实现差频同相切换^[16],在电机同步切换前将变频器输出频率调整至 51 Hz,则变频器空间线电压矢量相对于 dq 同步旋转坐标系以 2π rad/s 的相对角速度 (1 rad/s) 旋转,同步切换控制系统以 12 kHz 的采样频率对电网三相相电压和变频器三相线电压进行采样,并实时计算变频器空间线电压矢量在 dq 同步旋转坐标系下的直轴分量 u_d 和交轴分量 u_q ,当 u_d 和 u_q

满足式(12)时,变频器线电压空间矢量位于图 1 中的虚线位置,此时即为电机进行同步切换的最佳切换时刻。

同步切换控制系统中切换开关的开关动作时间对系统的影响较大,一般交流接触器的开关延时为 0.1 s 左右,约为 5 个工频周期,在这段开关延时时间内电机速度因负载的不同,其变化差异很大,若不采取改进措施,极易引起两者相位偏差大而导致电机切换时形成瞬时大电流冲击。为避免交流接触器的开关延时对系统的影响,本文采用绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 和电力二极管设计了全控型电力电子开关,物理结构如图 3 所示, A、B 端子用于串接在交流电路中控制交流电路的开通和关断, IGBT 集电极和发射极分别连接在二极管桥式整流电路直流输出端的正极和负极,其中, R、C 为电压尖峰吸收网络,以防止 IGBT 关断时被高压击穿。切换信号控制 IGBT 的栅极电压以控制 IGBT 的开通和关断,当 IGBT 开通时,由于整流桥直流侧短路, A、B 端子的等效电阻为 0, A、B 端子中流过交流电流,即处于交流闭合状态;当 IGBT 关断时,由于整流桥直流侧开路, A、B 端子中的交流电流即被切断, A、B 端子处于交流开路状态。根据以上分析可知,切换信号可控制 A、B 端子所串接的交流电路的开通和关断。

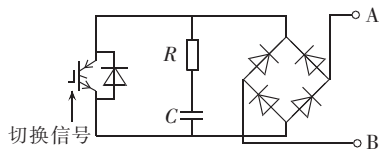


图 3 电力电子开关电路拓扑

Fig.3 Topology of electronic power switch

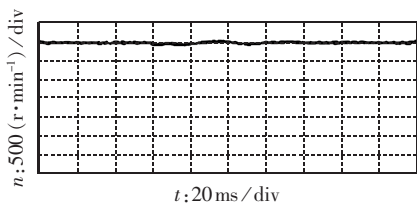
电机在变频器激励下运行时,变频器侧的交流接触器 KM_3 和电力电子开关 KM_4 均处于闭合状态,电网侧的交流接触器 KM_1 和电力电子开关 KM_2 均处于断路状态。电机需要切换至电网时,同步切换控制器通过通信接口控制变频器的输出电压频率略高于电网频率 (一般为 51 Hz) 至电机运行于稳态,保持电力电子开关 KM_4 导通,给交流接触器 KM_3 发送触发信号控制其断开,等待 0.1 s 确保 KM_3 完成开关动作后,同步控制器通过 AD 采集电网和变频器的电压数据,根据以上提出的同步检测方法捕获最佳切换时刻。在切换时刻,控制器先关闭 KM_4 ,延时 50 μ s 以提供死区时间,然后同时触发 KM_1 和 KM_2 使其导通,由于 KM_2 开通时间不超过 1.5 μ s,因此 KM_2 先于 KM_1 导通,约 0.1 s 后,交流接触器 KM_1 完全闭合,将 KM_2 短路, KM_2 中的电流即为 0,因此电机切换成功并进入稳态运行后,电力电子开关电流为 0,无需进行散热处理,节省了空间和成本。同时根据以上控制过程,交流接触器 KM_1 、 KM_3 的近似零电压开通和

关断,均不会产生电弧,提高了系统的安全性。

4 实验结果

为验证理论分析和研究的有效性,本文以 TMS-320F28335 DSP 为核心在实验室设计了同步切换控制系统,对一台功率为 4 kW、极对数为 2 的三相异步电机进行了变频-工频切换实验,电机通过联轴器与测功机和测速发电机相连接,测功机负载转矩设置为 25 N·m。在此实验系统的基础上,本文对基于电网电压定向的电机同步切换控制策略进行了实验研究,并对单一采用交流接触器和采用电力电子开关与交流接触器并联的切换方式进行了对比实验,实验波形如图 4 所示。

由图 4(a)和(b)可见电机切换至电网时形成较大的电流冲击,冲击电流为稳态电流的 5 倍左右,电机转速下降较多;由图 4(c)和(d)可以看出电机切换



(f) 采用电力电子开关基于电网电压空间矢量同步切换的电机转速

图 4 电机同步切换实验波形

Fig.4 Experimental waveforms of motor synchronous switching

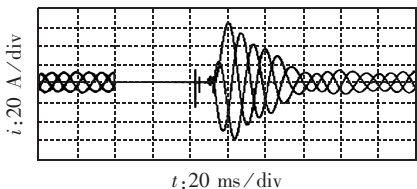
至电网时没有出现大的冲击电流,冲击电流的峰值约为稳态峰值的 2 倍左右,由于采用电力电子开关,电机切换至电网时对电网的电流冲击大幅减小,电机速度变化较小,在发生较小幅度的振荡后逐步进入稳态;由图 4(e)和(f)可以明显看出电机切换至电网时对电网的电流冲击大幅减小,冲击电流的峰值进一步降为稳态峰值的 1.2 倍左右,电机速度变化较前两者更小,基本消除了电机切换至电网时对电网的电流冲击,电机切换前后转速在发生轻微波动后快速进入稳态。

5 结论

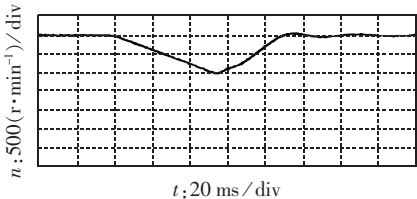
本文针对三相异步电机在进行变频-工频切换时会对电网形成较大电流冲击的问题,提出了一种基于电网电压矢量定向的同步控制策略,综合考虑电网三相电压的相位和幅值信息,研究了在电网电压矢量定向的同步坐标系内变频器输出电压的相位检测方法,确保电机切换时刻变频器输出电压空间矢量和电网电压空间矢量的相位取得一致,最大限度地降低电机切换时对电网的电流冲击;同时,以本文提出的电力电子开关与交流接触器并联工作的新思路构建的实验系统,实测结果表明可将变频-工频开关切换延时缩短至 50 μs 左右,仅为目前广泛采用的单一交流接触器切换方式延时时间的 0.05 %,由此可大幅提高变频-工频切换的控制精度,同时也增强了该切换控制系统对于不同电机和负载的适应性,并从根本上消除了切换电弧,提高了设备和局部电网的安全性。

参考文献:

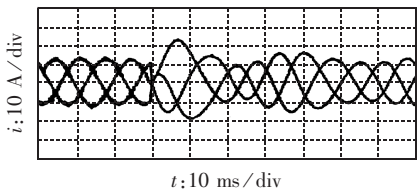
[1] 刘杰,庞科旺. 基于变频器的锁相环在恒压供水中的应用研究[J]. 科学技术与工程,2011,11(18):4211-4214.
LIU Jie,PANG Kewang. An inverter application research in constant water supply[J]. Science Technology and Engineering, 2011,11(18):4211-4214.
[2] 朱洪波,于庆广,李铭,等. 高压变频器与工频电源之间软切换方式的研究[J]. 电力系统自动化,2004,28(6):91-93.
ZHU Hongbo,YU Qingguang,LI Pei,et al. Research on soft-switching mode between high-voltage inverter and fundamental frequency power supply[J]. Automation of Electric Power Sys-



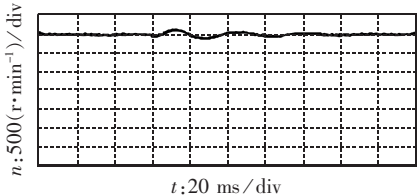
(a) 采用交流接触器基于锁相环同步切换的电机电流



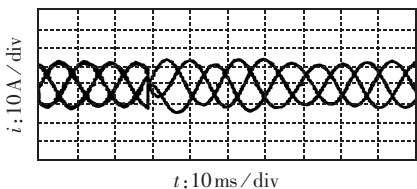
(b) 采用交流接触器基于锁相环同步切换的电机转速



(c) 采用电力电子开关基于锁相环同步切换的电机电流



(d) 采用电力电子开关基于锁相环同步切换的电机转速



(e) 采用电力电子开关基于电网电压空间矢量同步切换的电机电流

- tems, 2004, 28(6): 91-93.
- [3] 胡纲衡, 唐瑞球, 江志敏, 等. 交流变频调速的切换控制技术[J]. 电工技术杂志, 2001(6): 43-45.
- HU Gangheng, TANG Ruiqiu, JIANG Zhimin, et al. Transfer control technology of AC variable frequency drive[J]. Electrotechnical Journal, 2001(6): 43-45.
- [4] 赵跃, 张伊辉, 郑岗. 回转式空气预热器变频-工频同步切换控制器[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(8): 71-74.
- ZHAO Yue, ZHANG Yihui, ZHENG Gang. VF-PF synchronous switchover controller for revolving air preheater[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(8): 71-74.
- [5] 冯志华, 刘强, 刘永斌. 基于锁相环的变频器同步跟踪实验[J]. 电工技术学报, 2006, 21(11): 96-100.
- FENG Zhihua, LIU Qiang, LIU Yongbin. Experimental study on synchronized tracing control of variable frequency devices based on phase locked loop[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(11): 96-100.
- [6] 卢春艳, 刘建坤, 徐溪. 基于单片机控制的电机变频/工频同步切换[J]. 煤矿机械, 2012, 33(11): 243-245.
- LU Chunyan, LIU Jiankun, XU Xi. Motor synchronous switching between the inverter power and power-frequency supply based on MCU control[J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(11): 243-245.
- [7] 刘思, 张加胜. 基于 PLC 控制的电机变频/工频同步切换[J]. 电气自动化, 2011, 33(1): 41-43.
- LIU Si, ZHANG Jiasheng. The motor synchronous switching between the inverter power and power-frequency supply based on PLC control[J]. Electrical Automation, 2011, 33(1): 41-43.
- [8] 刘英. 采用锁相同步切换技术的变频恒压供水系统[D]. 北京: 北京工业大学, 2002.
- LIU Ying. Variable-frequency constant-pressure water supply system using synchronous switch with PLL[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2002.
- [9] 陈文姬. 交流电机变频/工频运行切换锁相控制系统[D]. 东营: 中国石油大学, 2007.
- CHEN Wenya. The phase-locked synchronization control system of AC motor variable frequency/work frequency switching[D]. Dongying: China University of Petroleum, 2007.
- [10] 杨玉珍, 刘红云, 赵岗金, 等. 锁相技术在变频恒压供水系统中的应用[J]. 电气传动, 2003(6): 58-60.
- YAN Yuzhen, LIU Hongyun, ZHAO Gangjin, et al. Application of phase-lock technique in variable-frequency constant-pressure system of water supply[J]. Electric Drive, 2003(6): 58-60.
- [11] 徐甫荣. 关于变频器的输出切换问题探讨——兼论水泵群软起停控制方案[J]. 电气传动自动化, 2002, 24(4): 19-23.
- XU Furong. Exploration of output switching for frequency inverters[J]. Electric Drive Automation, 2002, 24(4): 19-23.
- [12] 丁学文, 金大海. 交流电机变频软启动时的问题及解决方法[J]. 电力电子技术, 2001, 35(5): 1-2, 5.
- DING Xuewen, JIN Dahai. The problem and countermeasure in soft starting of AC motor with an inverter[J]. Power Electronics, 2001, 35(5): 1-2, 5.
- [13] 黄良沛, 刘义伦, 阳小燕. 大功率电机平稳切换的理论探讨与方法研究[J]. 大电机技术, 2004(3): 13-16.
- HUANG Liangpei, LIU Yilun, YANG Xiaoyan. Discussion in theory and research in method of smooth transformation for high-power electromotor[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2004(3): 13-16.
- [14] 汤蕴璆, 张奕黄, 范瑜. 交流电机动态分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 80-84.
- [15] 王成元, 夏加宽, 孙宜标. 现代电机控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 19-28.
- [16] 侍寿永. 变频器的切换分析和同步控制[J]. 电气传动, 2012, 42(7): 69-72.
- SHI Shouyong. Analysis and synchronous control of switching of variable frequency device[J]. Electric Drive, 2012, 42(7): 69-72.

作者简介:

徐友(1978-), 男, 江苏扬州人, 讲师, 博士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动、新能源发电并网稳定性控制(E-mail: seuyxu78@163.com);

刘永超(1981-), 男, 重庆人, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统稳定控制及保护;

郑建勇(1966-), 男, 江苏南京人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 研究方向为电力电子与新能源发电;

华伟(1973-), 男, 江苏苏州人, 高级工程师, 研究方向为制水工艺及优化调度。

Synchronous switching control based on grid-voltage vector orientation for three-phase asynchronous motor

XU You^{1,2}, LIU Yongchao³, ZHENG Jianyong¹, HUA Wei⁴

(1. Electrical Engineering School, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. College of Engineering, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210031, China; 3. State Grid Chongqing Electric Power Design Institute, Chongqing 401147, China; 4. Suzhou City Water Company, Suzhou 215002, China)

Abstract: There is bigger current impacting on grid when the high-capacity three-phase asynchronous motor switches between VF(Variable Frequency) and PF(Power Frequency), for which, a strategy of synchronous switching control based on grid-voltage vector orientation is developed. The circuit topology of an electronic power switch connected in parallel with an AC contactor is adopted to realize the synchronous switching between VF and PF. The space vector phase of transducer output line voltage is detected in the grid-voltage synchronous coordinates system, and the electronic power switch and AC contactor are triggered when it is 30 degree for the synchronous switching. Experimental results indicate that, the proposed control strategy captures accurately the best moment for the synchronous switching between VF and PF with zero phase-error, which greatly reduces the switching time, increases the control accuracy and enhances the system adaptability to different motors and loads.

Key words: asynchronous machinery; grid-voltage vector orientation; VF-PF synchronous switching; electronic power switch; grid-voltage synchronous coordinates system; switching