永磁电机无电解电容驱动系统研究综述

赵楠楠, 王高林*, 徐殿国

哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 哈尔滨 150001

* E-mail: WGL818@hit.edu.cn

收稿日期: 2020-03-07; 接受日期: 2020-06-15; 网络版发表日期: 2020-07-17

国家自然科学基金(批准号: 51877054)、台达电力电子科教发展计划(编号: DREM2018001)、中国博士后科学基金(编号: BX20190096, 2019M661281)和黑龙江省博士后科学基金(编号: LBH-Z19016)资助项目

摘要 永磁同步电机无电解电容驱动技术可以提高系统可靠性、降低成本以及减小体积, 成为了现代电机驱动系统的一个重要发展方向, 目前已在航空航天、工业传动和家用电器等领域得到了成功应用. 本文主要围绕高功率因数控制技术、网侧输入电流谐波抑制和稳定性控制方法三个方面对永磁同步电机无电解电容驱动系统的发展现状进行介绍, 针对这三个方面的关键技术和已取得的研究成果进行归纳和总结, 指出了相应解决方案的优缺点, 并进行了对比分析. 最后针对永磁同步电机无电解电容驱动系统目前亟需解决的问题和发展趋势进行了分析和展望.

关键词 永磁同步电机驱动系统, 无电解电容, 高功率因数控制, 网侧输入电流谐波抑制, 稳定性控制

1 引言

为了解决传统电机驱动系统母线电解电容可靠性低、寿命短的问题, 近年来无电解电容电机驱动方案得到了关注^[1-4]. 针对压缩机、风机和泵类负载等应用场合, 无电解电容电机驱动方案可以有效提高系统功率密度, 并进一步降低系统成本, 具有显著的应用优势. 无电解电容电机驱动系统通常采用小容量的薄膜电容代替较大容量的电解电容, 其容值可以降低至原来的1/50~1/20. 母线电容容值的降低, 导致直流母线电压大幅度波动, 使得驱动系统的电网输入侧和逆变器输出侧能量严重耦合^[5,6]. 因此, 相比于传统有电解电容电机驱动系统, 无电解电容电机驱动系统面临着

一系列新的问题和挑战^[7,8].

由于无电解电容电机驱动系统的输入侧和输出侧交互耦合特性显著, 可以充分利用这个特点, 通过对逆变器输出侧施加特定的高功率因数控制策略, 以提高网侧输入的功率因数^[9]. 对于网侧输入电能质量要求严格的应用场合, 这种控制策略可以省略功率因数校正电路, 进一步降低系统的成本, 同时系统的可靠性也能够得到提升^[10-12].

LC(电感电容)滤波电路在无电解电容电机驱动系统中得到了广泛应用, 可以有效抑制网侧输入电流的高次谐波. 当电机运行于稳态时, 驱动系统输出侧呈现为恒功率负载, 具有负阻抗特性. 由于网侧和逆变器侧的能量耦合, 当LC滤波电路的谐振特性与电机负

引用格式: 赵楠楠, 王高林, 徐殿国. 永磁电机无电解电容驱动系统研究综述. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 863-875
Zhao N N, Wang G L, Xu D G. Review of electrolytic capacitor-less PMSM drives (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 863-875, doi: 10.1360/SST-2020-0076

阻抗特性交互作用时, 网侧输入电流在谐振频率附近的谐波成分明显增加, 甚至导致系统不稳定. 这种网侧输入电流谐波问题和系统稳定性问题也是目前研究关注的热点问题^[13-15].

在传统母线具有大容量电解电容的永磁电机驱动系统中, 为了实现电机磁链和转矩的解耦控制, 基于转子磁场定向的矢量控制技术得到了广泛应用. 针对无电解电容永磁电机驱动系统, 驱动系统应用需求和拓扑结构的改变, 使得仅依靠传统基于转速和电流双闭环的矢量控制方案难以满足系统的实际工况要求. 因此, 以基于转子磁场定向的矢量控制技术为基础, 研究适用于无电解电容永磁电机驱动系统的优化控制策略得到了较多的关注^[1-25].

本文将对永磁同步电机无电解电容驱动系统的高功率因数控制方法、网侧输入电流谐波抑制方法和稳定性控制方法三个方面进行阐述, 首先介绍相关控制方法原理, 结合现有研究方案, 对其中的技术难点、实施方式以及控制性能等方面进行综合评价, 对永磁同步电机无电解电容驱动系统的技术研究现状进行分析和总结.

2 驱动系统高功率因数控制方法

永磁同步电机无电解电容驱动系统网侧输入高功率因数控制方法主要是依据驱动系统的功率平衡方程, 通过控制逆变器输出功率特性, 以此来调节网侧输入功率特性, 实现网侧输入功率因数的提升.

无电解电容电机驱动系统如图1(a)所示, 驱动系

统主要由整流器、小容量薄膜电容和逆变器组成. 相比于传统的电机驱动系统, 由于母线电容容量的降低, 母线电压波动明显, 如图1(b)所示, 逆变器输出电压也会受到母线电压波动的影响. 假设网侧输入功率因数为1, 此时, 网侧输入电压 u_g 和网侧输入电流 i_g 可以表示为

$$u_g = U_g \sin(\omega_g t + \varphi_g), \quad (1)$$

$$i_g = I_g \sin(\omega_g t + \varphi_g), \quad (2)$$

其中, U_g 和 I_g 分别为网侧输入电压和电流的最大值, ω_g 和 φ_g 分别为网侧输入电压和电流的角频率与相位. 相应地, 驱动系统网侧输入和逆变器侧输出的功率平衡方程可以表示为

$$P_g = P_{dc} + P_{inv}, \quad (3)$$

其中, P_g , P_{dc} 和 P_{inv} 分别为网侧输入功率、母线电容功率和逆变器侧输出功率.

由式(1)~(3)可知, 网侧输入功率因数与逆变器侧输出功率密切相关. 相比于逆变器侧电机电磁功率, 逆变器的开关和通态损耗可以忽略. 此时可以近似认为逆变器侧输出功率与永磁电机电磁功率相等. 因此, 目前普遍采用通过调控永磁电机电磁功率实现网侧高功率因数控制的解决方案^[16-25].

2.1 基于交轴电流指令的逆变器功率控制

Inazuma等人^[16]建立了逆变器输出功率控制回路, 采用重复控制器与PI控制器相结合的复合控制方式来提高功率控制效果, 具体结构如图2所示. 其中, 母线电

图1 无电解电容驱动系统拓扑及能量流动图. (a) 拓扑结构图; (b) 能量流动图

Figure 1 Topology and power flow characteristics of the drive system. (a) Drive system topology; (b) drive system power flow characteristics.

图 2 (网络版彩图)逆变器输出功率控制框图^[16]

Figure 2 (Color online) Block diagram of inverter output power control [16].

容功率 P_{dc} 可以表示为

$$\begin{aligned} P_{dc} &= u_{dc} C_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} \\ &= u_{dc} C_{dc} \frac{d}{dt} \left\{ U_g \sin(\omega_g t + \varphi_g) \right. \\ &\quad \cdot \text{sgn}(\sin(\omega_g t + \varphi_g)) \left. \right\} \\ &= \frac{1}{2} U_g^2 C_{dc} \omega_g \sin(2(\omega_g t + \varphi_g)). \end{aligned} \quad (4)$$

将转速控制器的输出信号与电机转速相乘得到驱动系统平均功率信号 P_{avg} , 经过包含网侧输入电压相位信息的信号调制后, 作为网侧输入参考功率信号. 根据式(3)可知, 将网侧输入参考功率信号与电容功率信号相减, 作为逆变器输出参考功率信号. 将实际电机输出功率作为反馈信号, 经过重复控制器与PI控制器调节后作为交轴参考电流信号.

这种通过功率平衡方程建立的功率控制回路是网侧输入高功率因数控制方案的基本控制结构. 由于文献[16]中重复控制器参数计算步骤复杂, 赵楠楠等人^[17]采用比例谐振控制器代替文献[16]中的重复控制器与比例积分控制器结合的复合控制方式, 简化了控制算法的复杂度.

2.2 基于直交轴电流指令的逆变器功率控制

由于逆变器输出功率在直、交轴之间存在耦合, 所以在基于交轴的功率控制回路基础上, 优化直轴弱磁电流给定方式有助于提升逆变器输出功率控制效果, 提高网侧输入功率因数.

Jung等人^[18]提出了一种基于平均电压约束的弱磁控制方法, 将波动的母线电压在网侧输入电压半个周期内的平均值作为弱磁参考电压, 优化直轴参考弱磁电流信号, 同时, 采用包含网侧输入电压相位信息的信号调制生成交轴参考电流信号, 使得网侧输入的功

率因数达到0.96以上. 由于这种直轴弱磁电流生成方法需要负载转矩信息, 增加了其在负载变化或负载状态未知场合的应用难度. Son和Ha^[19]根据电机运行工况与母线电压波动情况, 同时优化了直、交轴参考电流给定方式. 为了进一步提高逆变器输出功率的控制效果, 采用了独立于直、交轴电流控制回路之外的功率控制误差补偿模块, 通过误差补偿模块直接修改电机电压指令信号, 可以取得较好的控制效果. 这种方法需要的计算量大, 对控制器的要求较高, 需要预先设置驱动系统运行点, 采取离线计算与查表法相结合的实现方式. 此外, 考虑到由于母线电容导致实际逆变器功率信号与网侧输入电压信号的相位不同步问题, Tau和Tzou^[20]调整了交轴参考电流相位, 同时对母线电压波动信号也进行了前馈补偿, 并在实验样机上取得了良好的控制效果. 通过调整直、交轴参考电流的方法可以有效提高网侧输入的功率因数. 在此基础上, 为了兼顾驱动系统性能, Lamsahel和Mutschler^[13]采用了梯形交轴参考电流形式, 这样可以减小交轴电流的低次谐波, 抑制驱动系统的转矩波动. 但这种方法没有考虑对逆变器输出功率进行有效控制, 导致网侧输入电流难以满足相关的谐波标准.

在满足网侧输入电流谐波标准的前提下, 提高永磁同步电机无电解电容驱动系统效率具有重要的实际意义^[21-23]. 可以通过调节直轴弱磁电流幅度, 来减小电机电流幅值, 降低驱动系统损耗, 提高驱动系统效率. Son和Ha^[21]通过调整直轴参考弱磁电流幅值, 控制母线电压波动的最小值, 减小电机电流幅值, 可以有效提高驱动系统的运行效率, 但这种控制方案所需计算量大, 难以实现在线运行, 只能通过查表的方式实现, 导致其鲁棒性变差. Chae和Ha^[23]依据母线电压与电机电压幅值的大小将系统运行状态分成两种工况, 通过考虑电机电压方程中的微分项, 调整直轴参考弱磁电

流幅值, 来提升驱动系统效率, 但其并未考虑负载变化的情况. 此外, Lee等人^[24]考虑了在母线上并联其他负载情况下, 通过调节直、交轴参考电流, 直接改变逆变器输出电压, 可以抑制并联的其他负载对于网侧输入电流品质的负面影响, 保证网侧输入的高功率因数. Tau等人^[25]通过母线电压前馈生成电机电压指令信号, 以减小因母线电压波动导致的电机转速波动. 以上控制方案均在保证网侧输入电流品质的情况下, 提高了永磁同步电机无电解电容驱动系统的控制效果, 有利于推广驱动系统的实际应用.

2.3 驱动系统拓扑电路优化方法

以上高功率因数控制方法主要是通过采用特定的电机控制算法来实现, 此外, 通过改变驱动系统的拓扑结构来提高网侧输入功率因数的方法也得到了一些关注.

Zhou等人^[26,27]在母线上增加了单级升压逆变器, 其拓扑结构如图3所示, 针对大惯量电机负载的交流调速场合, 采用母线电压前馈控制方法, 实现网侧输入高功率因数. Shin等人^[28]采用了在母线上并联补偿器的方法(图4), 这种拓扑结构能够有效提高网侧输入功率因数, 改善驱动系统的弱磁控制效果, 同时提高了驱动系统的效率, 这种改进的拓扑结构可以同时适用于单

图3 (网络版彩图)单级升压逆变器电机驱动系统^[26,27]
Figure 3 (Color online) Drive system with single-stage boost inverter [26,27].

图4 (网络版彩图)母线并联补偿器电机驱动系统^[28]
Figure 4 (Color online) Drive system with DC-link shunt compensator [28].

相和三相驱动系统. 王琨^[29]在整流电路和逆变电路之间增加了功率解耦电路, 通过控制解耦电路能量的存贮和释放, 也能够提高网侧输入功率因数, 具体拓扑结构如图5所示. 为了进一步简化驱动系统拓扑结构, Khan等人^[30]提出了将半桥整流电路和三相四开关逆变器结合的无电解电容电机驱动系统拓扑结构(图6), 采用了预测控制方法并同时考虑到母线电容吸收的功率, 这种方案的优点是更进一步降低驱动系统成本. 由以上分析可知, 采用新型拓扑结构可以有效提高网侧输入高功率因数, 但由于其改变了驱动系统拓扑, 增加了驱动系统的成本和体积, 因此, 目前通过软件控制算法提高网侧输入功率因数的方案得到了更为广泛的关注.

3 驱动系统网侧输入电流谐波抑制方法

降低驱动系统网侧输入电流谐波对于无电解电容电机驱动系统的实际应用及推广具有重要意义. 理论上, 2.1和2.2节中介绍的逆变器输出功率控制方法可以有效抑制网侧输入电流谐波, 根据式(3)所示的功率平衡方程, 若能够使逆变器的实际输出功率完全跟踪参考功率, 网侧输入电流的谐波将被完全消除^[16~20].

图5 (网络版彩图)功率解耦电机驱动系统^[29]
Figure 5 (Color online) Drive system with power decoupling circuit [29].

图6 三相四开关电机驱动系统^[30]
Figure 6 Drive system with three-phase four-switch inverter [30].

实际上, 由于逆变器输出功率的直、交轴耦合特性、调节器带宽限制以及母线电压波动导致驱动系统控制性能进一步降低, 使得对于逆变器实际输出功率的控制难以取得理想的控制效果, 并且网侧输入LC谐振特性导致网侧输入电流在谐振频率附近的谐波成分进一步增大^[31-33]. 为了满足相关的谐波标准, 需要针对驱动系统网侧输入电流谐波问题采用特定的抑制方法.

3.1 电机定子电流非理想特性的谐波补偿方法

由于网侧输入电流由直流母线电容电流和逆变器输入电流组成, 而逆变器输入电流会含有电机定子电流非理想特性引起的谐波成分, 这种谐波成分会导致网侧输入电流谐波成分增加.

Utsugi等人^[34]针对电机定子电流特定的11次谐波电流成分, 提出了一种复合控制方法, 在逆变器功率控制回路基础上, 设计了针对这种特定频率谐波电流的重复控制器, 形成了多重控制方式, 可以有效抑制网侧输入电流谐波成分. Hiraide等人^[35]针对电机定子电流非理想特性导致的电机电流谐波在直、交轴电流上形成的谐波分量, 构建了与电机定子电流谐波同频率的谐波滤波器, 滤波器的输出叠加到直、交轴电流回路上形成闭环控制, 取得了较好的控制效果. 他们^[34,35]采用的重复控制器或者谐波滤波器的系数在不同转速下需要重新计算, 使得这种方法在实际应用中受到了限制.

此外, 以上控制方法都是通过调节电机参考电流指令实现的, 当电机定子电流谐波频率过高时, 其控制效果会受到电流控制器带宽的影响, 可以通过直接改变电机电压信号来改善谐波抑制效果. Hiraide等人^[36]利用电机位置信息, 通过离线测试方式确定了补偿信号的相位信息, 将谐波抑制信号直接作用于电机电压指令信号, 理论上可以提高谐波抑制效果. 但由于在离线工况下难以获得准确的补偿信号相位信息, 所以单独采用这种谐波抑制方法, 只能取得有限的谐波抑制效果. Abe等人^[37]采用改变电机参考电流指令和电机电压指令相结合的控制方法, 能够取得较好的谐波抑制效果.

3.2 基于母线电压或电流信息的谐波补偿方法

在永磁同步电机无电解电容驱动系统中, 网侧输

入与逆变器侧输出能量耦合较为严重, 如3.1节中所述, 电机定子电流非理想特性会造成网侧输入电流谐波成分增加. 此外, 网侧输入与逆变器侧输出通过直流母线相互作用, 所以母线电压上的谐波特征可以体现网侧输入谐波和电机电流谐波的信息, 同时, 网侧输入LC谐振信息也可以通过母线电压信号获得.

Zhao等人^[38]提出了通过对母线电压实施有效控制来抑制网侧输入电流谐波的控制方案, 其控制框图如图7所示. 由于实际母线电压含有明显的谐波成分, 此时, 通过锁相环可以得到网侧输入电压的相位, 利用相位信息生成参考母线电压信号, 并采用PI控制器建立母线电压闭环控制环路. 由于母线电压控制器输出的电压补偿信号直接作用于传统基于转子磁场定向的矢量控制电机电压信号, 这种电压补偿信号相对于正常的电机运行控制可以当成扰动信号. 为了抑制其对于电机运行的负面影响, 将此电压补偿信号沿着电流矢量的方向解耦到电机实际电压矢量上, 使得电压补偿信号的幅值最小化(图8). 这种控制方案结构简单、计算量小且易于实现, 可以有效抑制网侧输入电流谐波以满足相关谐波标准. Xiao等人^[39]通过对母线电压进行控制的同时, 也考虑了实际的电容电流信号, 并将母线电压控制器的输出与电容电流信号直接补偿到 q 轴参考电流信号上, 取得了较好的效果. 由于这种方法对参考电流指令的补偿效果会受到电流调节器带宽的影响, 当网侧输入LC谐振频率高于调节器带宽时,

图7 (网络版彩图)母线电压闭环控制方案^[38]. (a) 实际母线电压波形; (b) 母线电压闭环控制框图

Figure 7 (Color online) Scheme of closed loop DC-link voltage control [38]. (a) Waveform of actual DC-link voltage; (b) block diagram of closed loop DC-link voltage control.

图 8 (网络版彩图)电压指令信号实现方法^[38]. (a) ΔP 通过与电流矢量平行的电压矢量信号实现; (b) $\Delta P > 0$ 情况; (c) $\Delta P < 0$ 情况
Figure 8 (Color online) Scheme of voltage command realization [38]. (a) ΔP is parallel to current vector; (b) $\Delta P > 0$; (c) $\Delta P < 0$.

会对驱动系统谐振抑制效果产生影响。

引起网侧输入电流谐波的另一原因是驱动系统网侧输入LC谐振,其导致电容电流含有与LC谐振同频率的谐波成分,这些谐波会造成网侧输入电流在谐振频率附近的谐波成分明显增加,难以满足相关的谐波标准。

Abe等人^[40]通过采用前馈电压信号控制母线电容的充放电过程,以抑制母线电压因谐振产生的谐波成分。母线电容容量较小,导致谐振频率较高,此时数字控制延时和死区效应对控制效果的影响较大,因此他们采用了一种周期性信号预测控制方法,实现了对于延时和死区效应的补偿。Mathe等人^[41]通过在整流二极管的开关时刻向电机驱动系统中注入控制电压信号,实时调整电机的输出功率来抑制电感和电容之间

的能量交换。将估计的理想母线电压信号与控制电压信号相加作为逆变器的参考电压信号,以抑制LC谐振现象,这种控制方法也适用于永磁同步电机无电解电容驱动系统。以上两种方法都是通过控制母线电容充放电过程,抑制电感与电容之间的能量交换,来实现对网侧输入LC谐振的抑制。此外,Akama等人^[42]采用瞬时电压控制方法来减小网侧输入电流谐波,通过永磁同步电机离散化模型预测对电机相电流进行预测,进而可以得到母线电流的预测值,来减小瞬时电压控制的误差,进一步提升网侧输入电流品质。

为了进一步降低系统成本,减小系统体积以及提高系统效率,无输入电抗器的永磁同步电机无电解电容驱动系统的相关研究也在逐步开展,其驱动系统具体拓扑结构如图9所示。Abe等人^[43]建立了考虑电机瞬

图 9 无电抗器的无电解电容电机驱动系统^[43,44]

Figure 9 Electrolytic capacitor-less motor drive system without line inductor [43,44].

时功率特性的转矩控制环节, 在提高逆变器输出功率控制效果的同时, 也增强了对电机参数变化的鲁棒性, 并采用基于平均母线电流控制的前馈电压控制方法, 降低了网侧输入电流的谐波含量. 此外, 他们^[44]采用了考虑母线电压波动导致电流调节器饱和的母线电流直接控制方法, 建立了基于交轴的功率控制回路, 并优化了直轴弱磁电流给定方式, 通过对直接母线电流的直接控制, 降低了网侧输入电流的谐波. 以上控制方案省略了网侧输入的滤波电感, 使得网侧输入电流含有明显的高次谐波成分, 会对电网品质造成负面影响, 这是无电抗器的永磁同步电机无电解电容电机驱动系统亟需解决的主要问题.

4 驱动系统稳定性控制方法

电机驱动系统作为典型的恒功率负载, 与网侧输入 LC 谐振相互作用, 将严重影响永磁同步电机无电解电容驱动系统的稳定性. 为了研究驱动系统的稳定性问题, 驱动系统模型可以简化为图 10 所示^[45~47], 电机及逆变器简化为恒功率负载, 其大小由电机实际负载决定. 网侧输入电流 i_g 可以表示为

图 10 (网络版彩图)驱动系统等效模型^[45~47]

Figure 10 (Color online) Equivalent model of the drive system [45~47].

$$i_g = i_{inv} + i_{cap}, \quad (5)$$

其中, i_{inv} 和 i_{cap} 分别为母线电流和电容电流. 网侧输入电压 u_g 满足

$$u_g = L_g \frac{di_g}{dt} + R_g i_g + u_{dc}, \quad (6)$$

其中, L_g , R_g 和 u_{dc} 分别为输入侧电感、等效电阻以及母线电压. 实际上, 母线电流可以表示为

$$i_{inv} = \frac{P_L}{u_{dc}} = \frac{P_L}{u_{dc,0} + \tilde{u}_{dc}}, \quad (7)$$

其中, P_L , $u_{dc,0}$ 和 $\tilde{u}_{dc}$ 分别表示电机负载以及母线电压的平均值和偏差值. 通过将式(7)线性化可得

$$i_{inv} = \frac{P_L}{u_{dc,0}} - \frac{P_L}{u_{dc,0}^2} \tilde{u}_{dc}. \quad (8)$$

联立以上方程, 可以得到驱动系统的特征方程为

$$s^2 + \left(\frac{R_g}{L_g} - \frac{P_L}{C_{dc} u_{dc,0}^2} \right) s + \frac{1}{L_g C_{dc}} \left(1 - \frac{P_L R_g}{u_{dc,0}^2} \right) = 0. \quad (9)$$

依据劳斯判据, 可以得到驱动系统稳定条件为

$$\begin{cases} 1 - \frac{P_L R_g}{u_{dc,0}^2} > 0, \\ \frac{R_g}{L_g} - \frac{P_L}{C_{dc} u_{dc,0}^2} > 0. \end{cases} \quad (10)$$

对于实际系统来说, 式(10)的第一个条件比较容易满足, 驱动系统的稳定性约束主要由第二个条件决定. 对于永磁同步电机无电解电容驱动系统, 由于母线电容容量的大幅度降低, 其稳定性会受到很大的影响. 因此, 相关稳定性控制方法的研究得到了广泛关注.

4.1 直接改变特征方程系数的稳定性控制方法

由式(9)可知, 驱动系统稳定的充分必要条件是特征方程的系数恒大于零, 因此, 可以通过制定相应的控制策略重构驱动系统特征方程, 实现驱动系统的稳定性控制^[45,46].

Heo 等人^[45]通过修改直轴参考电流指令, 将母线电压经过高通滤波器后, 得到其对应的小信号分量, 在系统特征方程中引入与母线电压小信号分量相关的系数, 使得特征方程的系数取值均大于零, 实现驱动系统的稳定性控制. Maheshwari 等人^[46]将驱动系统整流

和逆变部分进行联合建模, 得到了驱动系统的状态空间模型. 通过引入与母线电压小信号分量有关的反馈信号直接改变电机电压信号, 调节反馈信号的增益, 使得特征方程中相关项系数变为大于零, 此时驱动系统保持稳定. 最后, 通过感应电机实验平台验证了所提出方法的有效性, 这种控制方法对于永磁同步电机无电解电容驱动系统的稳定性控制也有所启发.

实际上, 导致驱动系统不稳定的根本原因是电机恒功率负载的负阻抗特性, 其导致特征方程(9)中的相关系数含有符号为负的部分. 当负载特性变为正阻抗特性后, 特征方程的相关系数将变为正值, 此时驱动系统保持稳定. 因此, Wang等人^[47]提出了基于虚拟正阻抗的控制方法, 将母线电压的小信号分解出来, 对其符号取反后重构作为参考母线电压信号以生成电机电压信号, 实现驱动系统的稳定性控制, 这种控制方法不局限于驱动系统的参数、运行方式和电机类型, 具有较强的鲁棒性. 进一步地, Feng等人^[48]对比分析了基于交轴电流指令、电压指令和改变母线电压小信号极性的三种稳定性控制方法对驱动系统稳定性以及电机电磁转矩的影响. 以上控制方案均通过建立合理的反馈回路以提高驱动系统的稳定性, 这与经典控制理论相一致.

4.2 基于虚拟阻抗的稳定性控制方法

基于虚拟阻抗的稳定性控制方法由于其物理意义

明确、实现方式简单等优点, 广泛应用于电力电子系统中以解决系统的谐振问题^[49,50]. 对于永磁同步电机无电解电容驱动系统, 基于虚拟阻抗的稳定性控制方法也得到了较多关注.

基于虚拟电阻的稳定性控制方法是基于虚拟阻抗控制方法中应用最为广泛的, 针对永磁同步电机无电解电容驱动系统, 虚拟电阻 R_{damp} 的可能配置如图11所示, 在驱动系统中增加虚拟电阻后, 可以有效提高驱动系统的稳定性^[51~54].

Lee和Sul^[51]提出了基于虚拟电阻的稳定性控制策略(图11(a)), 将虚拟电阻等效并联在电抗器两端, 通过在电机电压信号上施加网侧输入电压和母线电压的差值, 动态改变电机的阻抗特性, 实现驱动系统的稳定性控制. Zhao等人^[52]提出了基于母线电压反馈的有源阻尼控制方法, 本质上等效于图11(b)所示的基于虚拟电阻的稳定性控制方法, 通过引入母线电压反馈信号, 改变驱动系统阻尼特性, 提高驱动系统稳定性. 实际上, 图11(c)和(d)中所示方案均可以实现驱动系统的稳定运行. 通过对驱动系统低频动态特性和高频抗干扰特性的分析, 图11(c)中通过将虚拟电阻与电抗器串联的解决方案, 可以取得理想的综合控制效果^[53].

基于虚拟电容的稳定性控制策略也适用于永磁同步电机无电解电容驱动系统, 由式(10)可知, 驱动系统不稳定的原因是母线电容容值的大幅度降低, 因此, Magne等人^[54]提出了基于虚拟电容的稳定性控制方法,

图11 (网络版彩图)基于虚拟电阻的稳定性控制方案^[51~53]. (a) 虚拟电阻并联于网侧电感; (b) 虚拟电阻并联于母线电容; (c) 虚拟电阻串联于网侧电感; (d) 虚拟电阻串联于母线电容

Figure 11 (Color online) Scheme of the stabilization control method with virtual resistors ^[51~53]. (a) In parallel to the line inductor; (b) in parallel to the DC-link capacitor; (c) in series with line inductor; (d) in series with DC-link capacitor.

通过改变交轴参考电流指令来等效增加母线电容容值, 提高了驱动系统的稳定性. 但这种方法并没有考虑到电机直轴的功率耦合特性, 会影响其实际控制效果.

此外, 在频域内建立基于永磁同步电机矢量控制的阻抗/导纳模型, 进而可以采用级联系统稳定性判据对驱动系统稳定性进行分析^[6,48,55,56]. Feng等人^[6]在频域内建立了基于转子磁场定向的永磁同步电机矢量控制阻抗模型, 并分析了功率等级、控制器带宽以及多个负载间的相互作用对于阻抗模型的影响, 但其未能通过具体实验进行验证. 针对目前广泛采用的电机无位置传感器驱动控制技术, Feng等人^[56]建立了采用无传感器控制技术的永磁同步电机输入导纳模型, 分析了位置观测器对电机导纳模型的影响, 并通过实验验证了模型的有效性. 这种基于阻抗模型的分析方法为利用阻抗理论深入研究永磁同步电机无电解电容驱动系统稳定性问题建立了基础.

4.3 关于恒功率负载的稳定性控制方法

关于直流供电系统恒功率负载稳定性问题, 目前已有较多研究, 与无电解电容驱动系统的稳定性控制相似, 这两类系统的研究本质上都是针对负载负阻抗特性提出的稳定性分析与控制方法^[57~62].

Liutanakul等人^[57]通过采用带通滤波器和比例环节对母线电压进行处理, 改变交轴参考电流信号, 然后通过级联系统的稳定性判据, 绘制了施加稳定性控制策略前后的系统Nyquist曲线, 论证了稳定性控制方法的有效性. 实际上, 现有的针对永磁电机无电解电容驱动系统的研究主要基于小信号模型, 均适用于系统稳态工作点, 难以分析驱动系统的全局稳定性. 针对直流供电系统, 可以通过采用Takagi-Sugeno (TS)模糊模型^[58]、遗传算法^[59]以及李雅普诺夫函数^[60,61]等方法, 对系统全局稳定性进行分析. Marx等人^[62]对直流供电系统的稳定性控制方法研究进行了概括总结, 并且揭示了稳定性控制方法对于负载动态特性的影响, 从系统整体层面分析了系统的稳定性控制策略.

5 结论与展望

永磁同步电机无电解电容驱动系统可以有效提高

系统可靠性、降低成本, 是现代电机驱动系统的重要发展方向. 本文从高功率因数控制方法、网侧输入电流谐波抑制方法和稳定性控制方法三个方面对现有永磁同步电机无电解电容驱动系统的研究进行了归纳和分析.

(1) 高功率因数控制方法可以通过改变系统拓扑或通过软件控制算法实现, 目前, 主要研究热点集中在对软件控制算法的研究, 通过对逆变器输出功率的有效控制, 提高网侧输入功率因数. 目前, 对于逆变器输出功率控制的研究主要集中在直轴和交轴电流参考指令的优化生成方式. 其中难点在于: 因母线电压波动, 输出电压裕度不足, 导致实际电流难以跟踪电流参考指令; 逆变器输出功率的直轴和交轴耦合特性也影响了逆变器输出功率控制效果. 因此, 研究直轴和交轴电流参考指令的幅值优化和相位补偿方法, 对于提高逆变器输出功率控制性能具有重要意义.

(2) 网侧输入电流谐波抑制方法主要通过补偿电机定子电流的非理想特性以及对母线电压谐波进行有效控制来实现, 包括基于电压参考指令和电流参考指令两种具体实现方式. 其中, 基于电压参考指令的实现方式可以避免电流调节器带宽的影响并减小延迟效应. 抑制电机定子电流非理想特性导致网侧输入电流谐波的技术难点在于如何对驱动系统母线电流与电机定子电流的关系进行准确建模, 并进一步抑制母线电流中因电机定子电流非理想特性引起的谐波成分. 目前主要通过通过对母线电压进行闭环控制来抑制网侧输入LC谐振引起的网侧输入电流谐波, 但未能揭示系统母线电压谐波成分与网侧输入电流谐波的内在联系. 通过对电机精确阻抗建模方法的研究, 提出更加有效的网侧输入电流谐波抑制方案.

(3) 稳定性控制方法主要包括改变系统特征方程和采用虚拟阻抗的控制方法, 通过对母线电压和网侧输入电流建立合理的反馈回路, 提高驱动系统稳定性. 在实际应用中, 因恒功率负载导致的稳定性问题在直流供电系统的研究已较为深入, 对其解决系统全局稳定性的研究思路进行适当借鉴, 采用非线性分析与控制方法对永磁同步电机无电解电容驱动系统全局稳定性进行研究, 可以进一步丰富驱动系统的运行调控理论, 促进与推广驱动系统的实际应用.

参考文献

- 1 Ding D, Wang G, Zhao N, et al. An antiovervoltage control scheme for electrolytic capacitorless IPMSM drives based on stator current vector orientation. *IEEE Trans Ind Electron*, 2020, 67: 3517–3527
- 2 Bao D, Pan X, Wang Y. A novel hybrid control method for single-phase-input variable frequency speed control system with a small dc-link capacitor. *IEEE Trans Power Electron*, 2019, 34: 9016–9032
- 3 Kwak B G, Um J H, Seok J K. Direct active and reactive power control of three-phase inverter for AC motor drives with small DC-link capacitors fed by single-phase diode rectifier. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2019, 55: 3842–3850
- 4 Li H, Huang K, Luo H, et al. A motor torque control method based on integration quasi-resonant controller for reduced DC-link capacitance IPMSM drive system. In: *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. Xi'an, 2019. 1290–1295
- 5 Hota A, Qasim M, Kirty J L, et al. A low cost electrolytic capacitor-less induction motor drive based on a novel open loop model predictive control strategy. In: *Innovations in Power and Advanced Computing Technologies*. Vellore, 2019. 1–5
- 6 Feng Y, Mathe L, Lu K, et al. Analysis of harmonics suppression by active damping control on multi slim DC-link drives. In: *Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Florence, 2016. 5001–5006
- 7 Maekawa S, Sugimoto M, Yokoyama A, et al. Proposal of electrolytic capacitor-less and reactor-less drive system using triple three phase PMSM. In: *European Conference on Power Electronics and Applications*. Genova, 2019. 1–5
- 8 Yin Q, Li H, Luo H, et al. An improved sensorless vector control method for IPMSM drive with small dc-link capacitors. *Energies*, 2020, 13: 580
- 9 Abe K, Akama Y, Ohishi K, et al. Suppression method of increase in motor current at zero output voltage for an electrolytic capacitor-less inverter. In: *IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems*. Hamilton, 2018. 168–173
- 10 Huo J, Zhan H, Wang G, et al. Resonance analysis and suppression strategy for electrolytic capacitor-less permanent magnet synchronous motor drives. In: *International Conference on Power Electronics and ECCE Asia*. Busan, 2019. 1–6
- 11 Zhang G Z, Xu D G, Zhu L H, et al. Current control strategy of high power factor electrolytic capacitor-less motor drive (in Chinese). *Electric Mach Control*, 2018, 22: 100–106 [张国柱, 徐殿国, 朱良红, 等. 高功率因数无电解电容电机驱动系统电流控制策略. *电机与控制学报*, 2018, 22: 100–106]
- 12 Luo H, Wang Q, Yin Q. Control of electrolytic capacitor-less single-phase to three-phase converter for IPMSM drive. In: *Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Beijing, 2017. 1874–1881
- 13 Lamsahel H, Mutschler P. Permanent magnet drives with reduced DC-link capacitor for home appliances. In: *Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*. Porto, 2009. 725–730
- 14 Sivaram S, Dong J, Genderen A V, et al. Control of a 3-phase permanent magnet synchronous motor drive employing a slim DC-link. In: *International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. Toulouse, 2019. 1–5
- 15 Hayashi N, Ogawa T, Yaniguchi T, et al. Electrolytic capacitor-less single-phase to three-phase inverter with harmonics suppression control for air conditioner. In: *International Power Electronics Conference*. Niigata, 2018. 866–871
- 16 Inazuma K, Utsugi H, Ohishi K, et al. High-power-factor single-phase diode rectifier driven by repetitively controlled IPM motor. *IEEE Trans Ind Electron*, 2013, 60: 4427–4437
- 17 Zhao N, Wang G, Zhu L, et al. Control strategy of electrolytic capacitor-less permanent magnet synchronous motor drive based on regulation of inverter power (in Chinese). *Proc CSEE*, 2016, 36: 193–199 [赵楠楠, 王高林, 朱良红, 等. 基于逆变器功率调节的永磁电机无电解电容控制策略. *中国电机工程学报*, 2016, 36: 193–199]
- 18 Jung H S, Chee S J, Sul S K, et al. Control of three-phase inverter for ac motor drive with small DC-Link capacitor fed by single-phase AC source. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2014, 50: 1074–1081
- 19 Son Y, Ha J I. Direct power control of a three-phase inverter for grid input current shaping of a single-phase diode rectifier with a small DC-Link capacitor. *IEEE Trans Power Electron*, 2015, 30: 3794–3803
- 20 Tau J H, Tzou Y. PFC control of electrolytic capacitor-less PMSM drives for home appliances. In: *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Edinburgh, 2017. 335–341
- 21 Son Y, Ha J I. Discontinuous grid current control of motor drive system with single-phase diode rectifier and small DC-Link capacitor. *IEEE Trans Power Electron*, 2017, 32: 1324–1334

- 22 Abe K, Kada H, Ohishi K, et al. Copper loss minimization control at zero output voltage for electrolytic capacitor-less inverter. In: International Power Electronics Conference. Niigata, 2018. 3890–3895
- 23 Chae Y, Ha J. Motor current reference generation for reducing motor currents in drive systems with single-phase diode rectifier and small DC-link capacitor. In: IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Long Beach, 2016. 2801–2805
- 24 Lee W J, Son Y, Ha J I. Single-phase active power filtering method using diode-rectifier-fed motor drive. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2015, 51: 2227–2236
- 25 Tau J, Wu K, Tzou Y. Sensorless PMSM drive with large DC-link voltage fluctuation. In: Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Beijing, 2017. 2166–2171
- 26 Zhou Y, Huang W, Zhao J, et al. An adjustable-speed system with single-phase AC input based on electrolytic capacitor-less tapped-inductor single-stage boost inverters (in Chinese). *Proc CSEE*, 2014, 34: 1836–1843 [周玉斐, 黄文新, 赵健伍. 单相交流输入的无电解电容抽头电感单级升压逆变器在交流调速系统中的应用. *中国电机工程学报*, 2014, 34: 1836–1843]
- 27 Zhou Y, Huang W, Hong F. Single-phase input variable-speed AC motor system based on an electrolytic capacitor-less single-stage boost three-phase inverter. *IEEE Trans Power Electron*, 2016, 31: 7043–7052
- 28 Shin H, Chae Y H, Son Y, et al. Single-phase grid-connected motor drive system with DC-Link shunt compensator and small DC-Link capacitor. *IEEE Trans Power Electron*, 2017, 32: 1268–1278
- 29 Wang K. Research and design of a novel electrolytic capacitor-less power converter for permanent magnet synchronous motor (in Chinese). Dissertation of Masteral Degree. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017 [王琨. 用于永磁同步电机的新型无电解电容功率变换器研究与设计. 硕士学位论文. 镇江: 江苏大学, 2017]
- 30 Khan M F, Li W, Gao Q. An effective control strategy based on DC-link voltage regulation for an electrolytic capacitor-less IPMSM drive. In: International Conference on Electrical Machines and Systems. Jeju, 2018. 1246–1251
- 31 Soltani H, Blaabjerg F, Zare F, et al. Effects of passive components on the input current interharmonics of adjustable-speed drives. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, 2016, 4: 152–161
- 32 Soltani H, Davari P, Zare F, et al. Characterization of input current interharmonics in adjustable speed drives. *IEEE Trans Power Electron*, 2017, 32: 8632–8643
- 33 Liu T, Yang Z. Predictive current control for an IPMSM drive with a small film DC-link capacitor. In: Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Lisbon, 2019. 1278–1283
- 34 Utsugi H, Ohishi K, Haga H. Reduction in current harmonics of electrolytic capacitor-less diode rectifier using inverter-controlled IPM motor. In: Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, 2012. 6206–6211
- 35 Hiraide T, Ohishi K, Haga H. Input harmonic current reduction method for electrolytic capacitor-less inverter for IPMSM drive system. In: IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Taipei, 2013. 1–6
- 36 Hiraide T, Abe K, Ohishi K, et al. Current harmonics reduction method of electrolytic capacitor-less diode rectifier using inverter-controlled IPM motor. In: Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Vienna, 2013. 2697–2702
- 37 Abe K, Ohishi K, Haga H. Input current harmonics reduction control for electrolytic capacitor less inverter based IPMSM drive system. In: International Power Electronics Conference. Hiroshima, 2014. 3153–3158
- 38 Zhao N, Wang G, Xu D, et al. Inverter power control based on DC-link voltage regulation for IPMSM drives without electrolytic capacitors. *IEEE Trans Power Electron*, 2018, 33: 558–571
- 39 Xiao X, Zhang S, Ding Y, et al. Control method of PMSM driving system with small DC-link capacitor. In: IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Cincinnati, 2017. 1925–1931
- 40 Abe K, Haga H, Ohishi K, et al. Current ripple suppression control based on prediction of resonance cancellation voltage for electrolytic-capacitor-less inverter. *IEEE J IA*, 2017, 6: 1–11
- 41 Mathe L, Torok L, Wang D, et al. Resonance reduction for AC drives with small capacitance in the DC Link. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2017, 53: 3814–3820
- 42 Akama Y, Abe K, Ohishi K, et al. Predictive control of DC-link current based on IPMSM discrete equation in electrolytic capacitor-less inverter. In: IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems. Hamilton, 2018. 152–157
- 43 Abe K, Haga H, Ohishi K, et al. Fine current harmonics reduction method for electrolytic capacitor-less and inductor-less inverter based on motor torque control and fast voltage feedforward control for IPMSM. *IEEE Trans Ind Electron*, 2017, 64: 1071–1080

- 44 Abe K, Haga H, Ohishi K, et al. Direct DC-Link current control considering voltage saturation for realization of sinusoidal source current waveform without passive components for IPMSM drives. *IEEE Trans Ind Electron*, 2018, 65: 3805–3814
- 45 Heo H J, Choi S U, Park G Y, et al. DC-Link voltage stabilization using d-axis current injection for SPMSM driver with small DC-link capacitance. *J Electr Eng Technol*, 2019, 14: 1597–1606
- 46 Maheshwari R K, Munk-Nielsen S, Lu K. An active damping technique for small DC-link capacitor based drive system. *IEEE Trans Ind Inf*, 2013, 9: 848–858
- 47 Wang D, Lu K, Rasmussen P O, et al. Voltage modulation using virtual positive impedance concept for active damping of small DC-Link drive system. *IEEE Trans Power Electron*, 2018, 33: 10611–10621
- 48 Feng Y, Wang D, Blaabjerg F, et al. Active damping control methods for three-phase slim DC-link drive system: An overview and investigation. In: *IEEE International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia*. Kaohsiung, 2017. 2165–2170
- 49 Wang H, Ge X, Liu Y C. An active damping stabilization scheme for the suppression of the DC-link oscillation in metro traction drive system. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2018, 54: 5113–5123
- 50 Liu S, Su P, Zhang L. A virtual negative inductor stabilizing strategy for DC microgrid with constant power loads. *IEEE Access*, 2018, 6: 59728–59741
- 51 Lee W J, Sul S K. DC-Link voltage stabilization for reduced DC-link capacitor inverter. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2014, 50: 404–414
- 52 Zhao N, Wang G, Xu D, et al. An active damping control method for reduced DC-Link capacitance IPMSM drives. *IEEE Trans Ind Electron*, 2018, 65: 2057–2068
- 53 Zhao N, Wang G, Zhang R, et al. Inductor current feedback active damping method for reduced DC-link capacitance IPMSM drives. *IEEE Trans Power Electron*, 2019, 34: 4558–4568
- 54 Magne P, Marx D, Nahid-Mobarakeh B, et al. Large-signal stabilization of a DC-Link supplying a constant power load using a virtual capacitor: Impact on the domain of attraction. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2012, 48: 878–887
- 55 Zhao N, Wang G, Ding D, et al. Impedance based stabilization control method for reduced DC-link capacitance IPMSM drives. *IEEE Trans Power Electron*, 2019, 34: 9879–9890
- 56 Feng Y, Wang D, Blaabjerg F. Input admittance model for the sensorless controlled three-phase slim DC-link drive. In: *European Conference on Power Electronics and Applications*. Riga, 2018. 1–9
- 57 Liutanakul P, Awan A B, Pierfederici S, et al. Linear stabilization of a DC bus supplying a constant power load: A general design approach. *IEEE Trans Power Electron*, 2010, 25: 475–488
- 58 Marx D, Pierfederici S, Nahid-Mobarakeh B, et al. Contribution to determination of domain of attraction in power systems: Application to drives with input filter. In: *Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Houston, 2009. 1–8
- 59 Loop B P, Sudhoff S D, Zak S H, et al. Estimating regions of asymptotic stability of power electronics systems using genetic algorithms. *IEEE Trans Contr Syst Technol*, 2010, 18: 1011–1022
- 60 De Persis C, Weitenberg E R A, Dörfler F. A power consensus algorithm for DC microgrids. *Automatica*, 2018, 89: 364–375
- 61 Hatlehol M, Park D, Zadeh M K. A modified sliding mode controller for active stabilization of DC microgrids with constant power load. In: *Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Lisbon, 2019. 1–6
- 62 Marx D, Magne P, Nahid-Mobarakeh B, et al. Large signal stability analysis tools in dc power systems with constant power loads and variable power loads—A review. *IEEE Trans Power Electron*, 2012, 27: 1773–1787

Review of electrolytic capacitor-less PMSM drives

ZHAO NanNan, WANG GaoLin & XU DianGuo

School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

Electrolytic capacitor-less permanent magnet synchronous motor (PMSM) drives could improve the reliability and reduce the cost and volume of a drive system, which would be an important improvement over a conventional motor drive system. This has been successfully applied in aerospace, industry, and household applications. In this study, the development of the electrolytic capacitor-less PMSM motor drives is introduced, including the high power factor control, the grid harmonics suppression, and the stability control method. The key technique and related studies are summarized, and the advantages and disadvantages of this solution are illustrated and evaluated. Finally, the key issues and the development trend toward electrolytic capacitor-less PMSM drives were analyzed and summarized.

PMSM drive system, electrolytic capacitor-less, high power factor control, harmonics suppression of grid input current, stability control

doi: [10.1360/SST-2020-0076](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0076)