

论文总结

论文采用 LCL 滤波器，建立 LCL-HSPMSM 离散数学模型。文中研究对象为（从 LCL 滤波器输入电压到 HSPMSM 定子电流）传递函数：

$$G(s) = \frac{i_2(s)}{u_1(s)}$$

控制目标：在变频调速的情况下，使定子电流达到预期值，同时保证系统的鲁棒性。

基本原理：通过近似分解，将传递函数分解为低频分量（低通滤波器）和高频分量（带通滤波器）。由 Nyquist 稳定性，讨论系统传递函数在正负谐振频率（ $f_{1,2} = f_{res} \pm f_e$ ）以及零频率（ $f_3 = f_e$ ）三个频率点的四个相位裕度（ $f_3 = f_e$ 在 $\pm 180^\circ$ 之间，因此存在两个相位裕度），来分析系统的稳定性。由于系统只有在四个相位裕度都大于 0 时才能稳定，因此未来最大限度的提高系统的鲁棒稳定性，需要使四个相位裕度的最小值最大化。即：

$$\max\{\min(\text{PM}_1, \text{PM}_2, \text{PM}_3, \text{PM}_4)\}$$

这也就意味着，我们需要在线通过转速传感器求解出的 f_e 进行在线相位补偿，这也就意味着传感器的精度会很大程度影响该系统的鲁棒性。

存在的困惑

1. 在文章中第二页公式（2）提到的近似分解：

$$G_{ps}(s) \approx G_{psl}(s) + G_{psh}(s)$$
$$G_{psl}(s) = \frac{1}{R + (L_1 + L_2)s}, G_{psh}(s) = -\frac{1}{L_1 + L_2} \frac{s}{s^2 + \omega_{res}^2}$$

文章中没有给出对应的参考文献，也没有说明是根据 Bode 图还是传递函数极点进行分解的，何老师，这一个问题我没怎么想明白。

可能的创新点

何老师您好，我阅读完论文总结了几个可能的创新点，但是不知道是否有实现可能和研究价值。

1. 针对系统时延问题：由于论文中的相位增益是由上一时刻输出的转速得出的，也就是由 k 时刻求出的相位增益补偿 $k+1$ 时刻的相位，这样就存在时延问题。特别是在高速电机中，转速变化非常快，这样会使得时延导致的误差很大。处理该误差的方法主要有两个：

- 增加采样频率；
- 使用预测控制，通过 k 时刻的输出和状态预测后几步的输出和状态，再通过预测结果进行相位补偿，以此来解决时延问题。

方法一中采样频率的增加通常会使得成本的增加。因此方法二是有一定研究意义的。

但是在阅读了三篇论文后，发现 PMSM 的采样频率都达到了 15kHz，由这个频率粗略推算出由时延导致的转速误差只有 $\Delta n = 1.8 \text{r/min}$ 左右，在高速运转的情况下，似乎有点不足为虑了。

2. 关于系统扰动问题：论文中是通过当前转速 w_e ，通过同步转速公式求解得到的电角频率 f_e 对对应频率的相角裕度进行补偿。但是由于传感器存在误差，会使得输出的 w_e 和实际 w_e' 中存在误差。进一步使得补偿的频率点出现偏差，也就是补偿在 w_e 上的相位增益，实际上应当补偿在 $w_e + \Delta w_e$ 才对。

3. 原论文中仅考虑了系统的鲁棒性，而未对系统的时域性能（例如电流纹波，上升时间等）进行分析改善。针对这一点可以结合电流预测控制进行

改善。

4. 除此之外，也可以结合无传感器控制，预测出电机运行转速，进一步节约成本。

综合分析，是否可以在原系统的基础上，考虑无差拍电流预测控制或者无传感器预测控制进行节约成本和提高系统鲁棒性。