「电动机」

一种基于脉冲电压注入法的永磁同步电动机初始位置角识别方案

文/西安中车永电捷通电气有限公司　陈宇飞　李晓宇　赵安定

在永磁同步电动机的永磁体和绕组流过电流时产生的磁势共同作用下，定子铁心会产生饱和效应，导致绕组电感发生变化。在分析永磁体磁势和绕组磁势对绕组电感调制关系的基础上，根据电流响应幅值判断出电感值最小时对应的脉冲电压矢量角，即转子初始位置角。该方案无需额外的电动机参数，在静态下即可完成初始位置角辨识。最后在一台内嵌式永磁同步电动机上验证了该方案的正确性与可行性。

高性能的永磁同步电动机（permanent magnet synchronous motor，PMSM）调速系统需要获得精确的转子位置信息，以实现最佳电压矢量控制或最大转矩输出。若不能准确预知转子初值位置信息，就会出现转子暂时反转或失步，最终导致起动失败，表现在机车牵引系统，则会出现短暂性的倒车或振动，极端情况下，会导致列车无法正常起动。在工业、交通等诸多领域多采用旋转编码器检测永磁同步电动机转子位置，以对电动机进行高性能的控制，但旋转编码器本身存在机械安装误差，必须对旋变初始角进行误差校正。

目前，国内外学者已提出很多PMSM初始位置角检测方案，这些方案均基于电动机凸极效应和永磁磁势、绕组磁势对绕组电感的饱和效应。文献采用转子预定位方案，通过对定子绕组注入一定相序的直流电流使转子旋转到固定位置，获得该转子位置信息后便可起动，该方案在电动机起动前转子位置会发生突变和反转，不适用于对电动机平滑起动要求严格的场合，如轨道交通、电动汽车等领域。文献采用高频电压注入法，通过对高频电流响应进行坐标变换和低通滤波，得到与初始位置角有关的电流直流分量，该方案需要准确的电动机参数和注入高频电压的初相角。文献同样采用高频电压注入法，依据初始位置角对三相电流幅值的调制关系直接计算出初始位置角，该方案无需电动机参数，检测误差只依赖电流的采样精度。文献采用脉冲信号注入法，通过施加固定脉宽的电压信号，得到瞬态电流响应，根据初始相位角对电流响应幅值和斜率的调制作用，计算出初始位置角，该方案估计精度受电流检测误差和电动机参数的影响。

本文在文献基础上对永磁磁势和绕组磁势共同影响下的电感变化进行分析，提出一种易于工程实现的转子位置辨识方案。最后利用一台内嵌式永磁同步电动机验证了该理论的正确性与可行性。

绕组电感的饱和效应

1. 永磁体对绕组电感的调制作用

电动机在设计时，为充分利用铁磁材料会让磁路处于微饱和状态，在永磁体磁势的影响下，必然要引起绕组磁路的饱和度，从而影响绕组的电感值。当转子（永磁体）的位置角变化时，对绕组的饱和度影响也呈周期性变化，以A相为例，当永磁体位置角在0°和180°时，与A相绕组交链的永磁体磁通最多，饱和度最高，电感值最小，当

永磁体位置角在90°和270°时，与A相绕组交链的永磁体磁通最少，饱和度最低，电感值最大。电感变化曲线近似如图1表示，电感值由恒定分量和二次谐波分量组成。

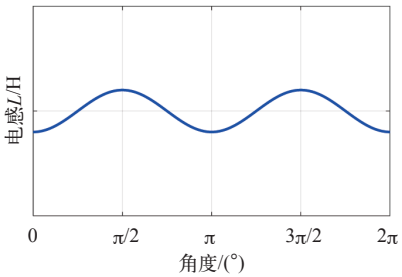

图1　凸极效应下的电感变化曲线

2. 绕组磁势对绕组电感的调制作用

绕组通入电流后将产生绕组磁势，绕组磁势会进一步对绕组的饱和度产生影响（退磁或充磁），绕组磁势对主磁路的影响如图2所示，当绕组电流产生的绕组磁势与永磁体磁势同向时，起增磁作用，主磁路将产生过饱和，电感值将减小；当绕组电流信号产生的绕组磁势与永磁体磁势反向时，起退磁作用，主磁路将退饱和，电感值将增大，此时电感值曲线可近似如图3表示，通过定性分析定子电流产生绕组磁势的相位角与增磁、退磁的调制关系可知，电感值将包含一个小幅值的基波分量，不考虑更高次谐波的情况下，电感幅值可用式（1）表示

$$l_{aa} = l_{aa0} + l_{aa1}\cos(\theta) + l_{aa2}\cos(2\theta) \qquad (1)$$

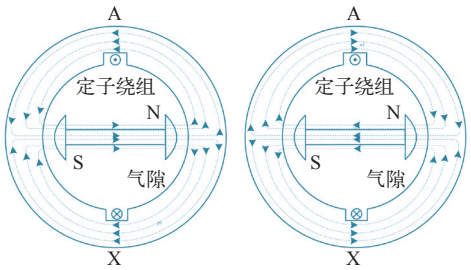

图2　定子磁链对主磁路影响示意图

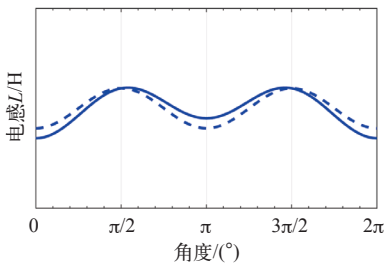

图3　考虑绕组磁势（单相）影响下的电感变化曲线

式中，l_{aa0}、l_{aa1}、l_{aa2}为绕组自感的恒定分量幅值、基波分量幅值和二次谐波分量幅值；θ为绕组磁势相位角和转子N极位置角度差。

以上分析未考虑相绕组间互感的饱和效应及定子齿槽带来的主磁场非正弦分布，实际电感值将含有更高次谐波分量。

初始位置角估计方案

根据电动机凸极效应对绕组电感的调制关系，通过对绕组电感进行测量，可得到转子凸极的位置角（N极或S极），该方法理论可行，但需要精确的电感测量设备和额外的NS极性辨识方案，实现起来比较复杂。考虑绕组磁势和永磁体磁势对绕组电感的调制关系可以反映到电流响应的幅值上，通过检测定子电流幅值的大小即可判断电感值大小。如图4所示，电动机本体可等效成RL串联电路，当电感值较小时，定子电流幅值相应增大，当电感值较大时，定子电流幅值相应减小，根据此对应关系可以判断，电流响应幅值最大时对应的电压矢量角即转子N极初始位置角。

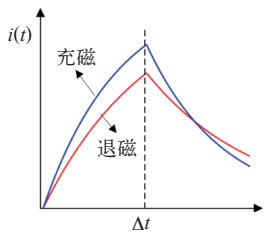

图4　RL脉冲电压作用下RL电路的电流响应

通过注入幅值相等，角度在0～2π范围变化的一系列脉冲电压矢量，得到相应的定子电流幅值如图5所示，为保证脉冲电压矢量注入前定子电流已衰减为零，脉冲间隔时间应大于10τ，其中τ是电动机时间常数。图5可以看出，在一个电周期内，定子电流幅值存在两个极大值，幅值较大的极大值对应主磁路的N极，另外一个极大值对应主

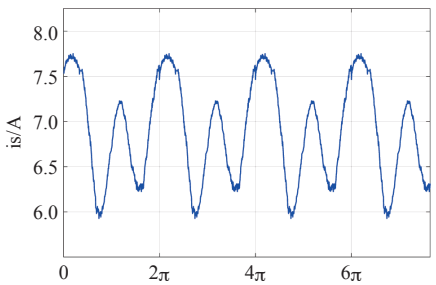

图5　不同角度电压矢量下的电流响应幅值

磁路的S极，即电流幅值可反映出绕组电感的恒值分量、基波分量和二次谐波分量，除此之外，受相绕组间饱和效应、定子齿槽和电动机本体结构设计不完全对称的影响，定子电流含有更高次谐波，图6为对一个基波周期内的电流幅值进行FFT分析结果，结果显示电流响应中大部分为恒值分量，其次是一次、二次谐波含量，并含有少量的高次谐波（大于等于三次）。

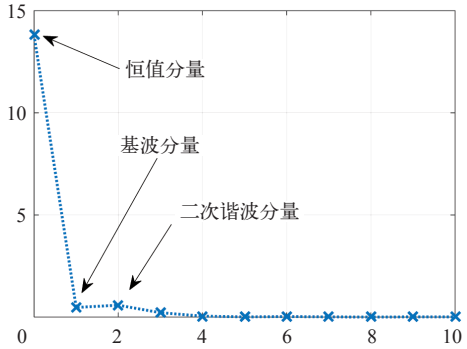

图6　对电流响应进行FFF分析后结果

试验与结果分析

为验证上述方案的正确性和可行性，在一台11 kW的内嵌式永磁同步电动机上进行了验证，图7为永磁同步电动机调速平台的主电路图。

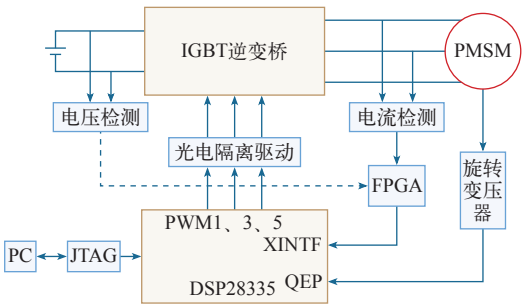

图7　试验平台主电路图

该方案的辨识精度直接受电流采样系统的影响，当电流响应幅值过小时，受干扰信号的影响，采样结果相对误差较大，且绕组磁势对绕组电感的磁饱和度影响较小，NS极对应的绕组电感值比较接近，可能导致辨识结果和真实值相差180°。当电流幅值较大时，电动机绕组的过饱和现象严重，电流响应在极大值附近出现“平顶”现象（如图8所示，此时初始位置角固定在26°），导致辨识结果误差很大，当电动机转子

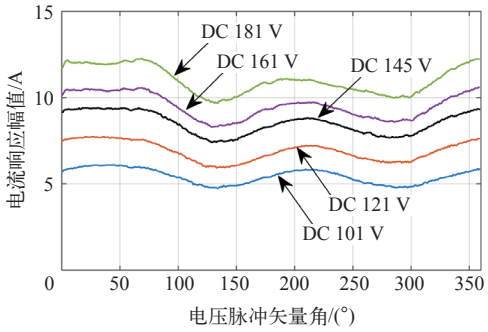

图8　不同母线电压下的电流响应幅值

没有堵转装置时，电流过大也会使电动机发生抖动。

图9为不同初始位置角时，真实值与估计值之间的误差，误差最大值13°，误差平均值5.95°。把检测到的初始位置角代入电动机控制程序，电动机正反转均可正常起动，未出现角度突变和反转现象。

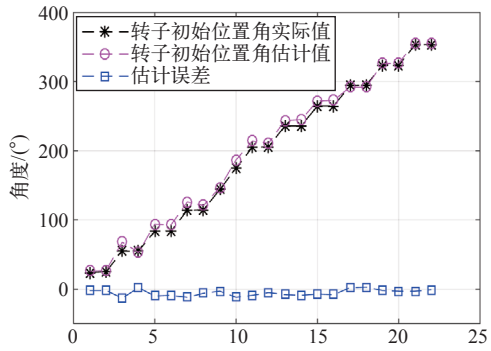

图9　转子初始位置角实际值与估计值对比

结束语

基于脉冲电压注入的PMSM转子初始位置检测方案，在保证电动机转子静止的前提下，根据绕组磁势和主磁势对绕组电感的饱和度影响关系，直接从电流响应中提取出转子位置信息，无需考虑电动机参数变化对辨识结果的影响，且电流幅值可控，从易实现性和安全性角度分析，比较适用于工程应用。考虑该方案的辨识结果比较依赖定子电流的准确检测，在保证注入电压频率的前提下，尽可能的提高一个周期内的电流采样点，有助于减小估计误差。**EA**

（收稿日期：2017.09.23）
（编辑：白文亭）