

一种双向储能变流器并网控制策略研究

卢胜利，鞠文耀，贾中璐

(南京电子技术研究所，江苏南京210039)

摘要：介绍了一种双向储能变流器(PCS)主电路拓扑结构。针对变流器并网电流谐波问题，提出一种基于复合控制技术的电流谐波抑制策略。由于受到电网谐波及调制的影响，双向储能变流器的并网电流中含有一定谐波，降低了装置输出电能质量。采用结合比例积分(PI)和重复控制的复合控制策略，能有效抑制双向PCS并网电流的谐波含量，并保证了系统双向控制的动态响应速度。在此基础上，研制了一台100kW双向PCS样机。实验结果验证了所提变流器并网控制方法的有效性和可行性。

1引言

大容量电池储能系统具有消峰填谷、平抑新能源发电出力波动、提供应急电源等功能。是智能电网建设和微网运行的重要发展方向。双向PCS是实现直流储能电池与交流电网之间双向能量传递的关键设备，其控制性能决定着整个储能系统的可靠性、控制精度和输出电能质量等重要指标。但受电网电压扰动及调制等因素影响，PCS并网电流中会含有大量谐波，导致系统谐波含量指标欠佳。此处对PCS中双向并网电流谐波抑制问题进行研究。给出采用PI控制和重复控制并联的复合控制算法。使系统的双向控制精度和输出电能质量都得到较大提高。最后通过实验验证了所提方法的有效性。

2主电路与建模

2.1主电路拓扑

图1示出一种双级式PCS主电路拓扑结构。

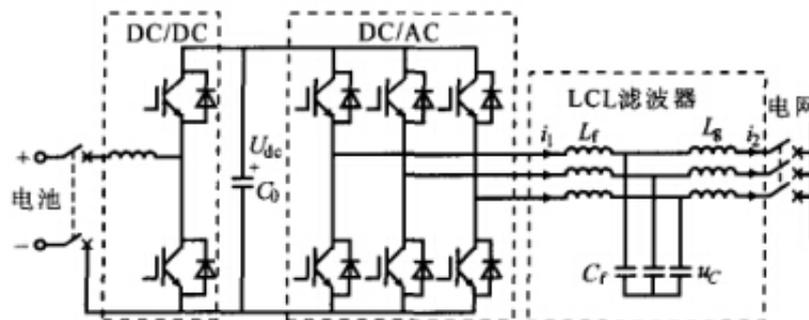


图1 双级式PCS主电路拓扑结构

Fig. 1 Main circuit of dual-stage PCS

前级为DC / DC直流变换器，采用半桥式双向Buck—Boost电路将电池电压升压至直流母线电压。根据直流侧电流 / 功率指令的闭环控制实现直流功率的双向传递；后级为DC / AC逆变整流器。采用三相全桥电路和LCL滤波器将直流母线电压逆变为三相交流电网电压，其中滤波电感可设计为隔离变压器漏感，以减小装置体积。由于LCL滤波器在谐振频率以上以60dB / dec斜率衰减，故可很好地抑制并网电流中的高频谐波。后级变流器采用电压外环、电流内环的双闭环控制方式。电压外环控制器通过稳定直流母线电压产生参考电流信号，再通过电流内环控制器实现交流侧有功和无功调节。以提高系统的动态性能并实现限流保护。前级变换器负责调节PCS直流侧充放电电流。仅通过直流母线与后级并网变流器相连。为减小直流电流纹波，前级DC / DC变换器可采用多重化载波移相方法进行多组并联。由于系统稳态下前级变换器对PCS并网电流波形质量的影响较小，故此处不对DC / DC控制作详细分析。

2.2并网变流器分析

为便于分析, 将后级并网侧变流器模型从三相静止 a, b, c 坐标系变换到两相同步旋转 d, q 坐标系, 得到其数学模型为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{Cd} \\ u_{Cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f s + R_f & -\omega L_f \\ \omega L_f & L_f s + R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u_{Cd} \\ u_{Cq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_g s + R_g & -\omega L_g \\ \omega L_g & L_g s + R_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{2d} \\ i_{2q} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{2d} \\ i_{2q} \end{bmatrix} = C_f \begin{bmatrix} s & -\omega \\ \omega & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{Cd} \\ u_{Cq} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_f, R_g 为 L_f, L_g 附加电阻; u_s 为电网电压; ω 为电网电压角频率。

图 2 示出三相 DC/AC 变流器在 d, q 坐标系下的数学模型结构框图。可见, d, q 轴电流除受控制量 u_d, u_q 影响外, 还与 $\omega L_f, \omega L_g, \omega C_f$ 和 u_s 之间存在相互耦合关系, 需进行解耦后对 d, q 轴电流分量分别进行控制。

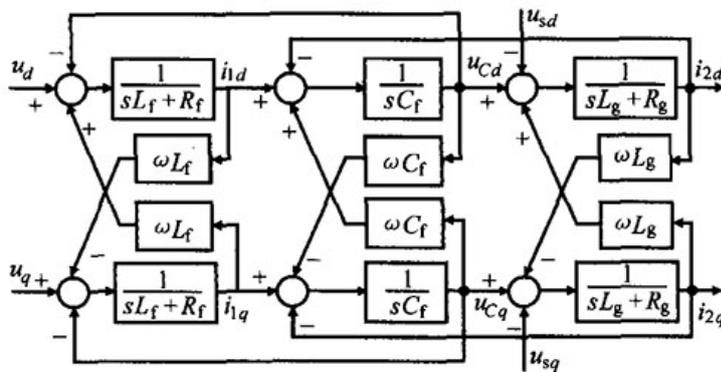


图 2 交流侧变流器在 d, q 坐标系下的数学模型

Fig. 2 Mathematical model of AC side converter in d, q coordinates

3 并网电流控制方法

3.1 重复控制器参数

重复控制是一种基于内模原理的控制策略^[4-5]。其内模离散形式为:

$$G_R(z) = K_R z^{k-N} S(z) / (1 - Qz^{-N}) \quad (2)$$

式中: N 为一个周期的采样次数; Q 为重复控制器稳态精度, 一般 Q 取为常数。

当 $Q=1$ 时，系统开环增益为无穷大，容易造成系统不稳定。所以通常 Q 取小于1但接近于1的一个常数。使控制器对周期性重复的扰动信号具有较高增益；补偿环节 $J_s(z)$ 用来校正控制对象的幅频特性，使其在中低频段的增益近似为零，以提高系统稳定性，一般选择串联校正环节和二阶低通滤波器组合； k 为相位超前环节，用来补偿改造后控制对象在中低频段的相位滞后； K 为重复控制器增益， K 越小，系统稳定性越好，但其收敛速度变慢且稳态误差增大，一般在保持系统稳定性前提下， K_r 应尽可能接近1。

由于存在周期性延迟环节，重复控制的控制作用要滞后一个周期才产生，当负载出现大扰动时，重复控制器输出不能立即变化，导致系统动态性能难以达到设计要求。

3.2 复合控制设计

并网变流器最常用的控制方法是基于电网电压定向的PI控制。但由于实际电网电压中含有丰富的谐波成分，尤其以工频谐波为主。而基于LCL滤波器的变流器系统在这个频率范围内的开环增益较低，因此PI控制在保证系统稳定性的前提下无法提供足够的低次谐波抑制能力。

根据PI控制和重复控制各自的优缺点。这里设计采用PI控制和重复控制并联的电流环复合控制器来对PCS并网侧谐波电流进行抑制。图3示出复合控制框图。

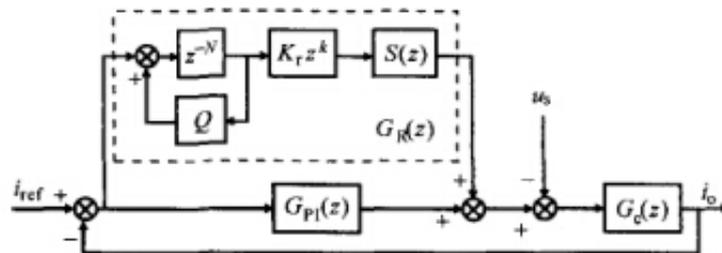


图3 电流环复合控制框图

Fig. 3 Block diagram of current loop hybrid control

复合控制器结合了PI控制器动态响应快和重复控制器稳态精度高的优点。在系统稳态时，系统跟踪误差小，主要由重复控制器根据历史误差累加调节系统输出；当负载出现突变，重复控制器由于周期性延时不产生作用，但PI控制器立即作用使跟踪误差迅速减小，一个周期后重复控制器产生调节作用。随着跟踪误差减小，PI控制作用逐渐减弱，直至系统重新达到稳态。因此，复合控制器在具有较好动态响应特性的同时，提高了系统的谐波抑制能力。由图3可得PCS并网输出电流与参考电流的闭环传递函数表达式为：

$$\frac{i_o}{i_{ref}} = \frac{G_c(z)[G_R(z)(z^N-Q)+K_z z^k S(z)]}{[1+G_R(z)G_c(z)](z^N-Q)+\frac{K_z z^k S(z)G_c(z)}{1+G_R(z)G_c(z)}} \quad (3)$$

同样可得 PCS 并网输出电流和扰动量的传递函数表达式为：

$$\frac{i_o}{u_a} = \frac{G_c(z)}{[1+G_R(z)G_c(z)](z^N-Q)+\frac{K_z z^k S(z)G_c(z)}{1+G_R(z)G_c(z)}} \quad (4)$$

式(3),(4)中闭环函数特征方程包含因子 $[1+G_R(z)G_c(z)]$,即系统单独采用 PI 控制器的特征方程,因此复合控制系统稳定的前提条件之一是单独的 PI 控制系统必须是稳定的,故复合控制中的 PI 参数可沿用单独 PI 控制器下的参数。由上式离散域传递函数可计算出闭环传递函数在低频段保持了较好的零增益和零相移特性,表明复合控制器保持了 PI 控制的快速动态响应;而复合控制扰动传函增益明显变小并趋于零,表明系统对低次谐波的抑制能力得到增强。

4 实验结果

基于上述理论,研制了一台 100 kW 镍盐电池双向储能变流器样机,控制系统采用 DSP+CPLD 双核架构,主控 DSP 芯片采用 TM320F28335。系统主要技术参数如下:额定容量 100 kW;电池电压范围 250~420 V;允许电网电压范围 $(380\pm 15\%)$ V;允许电网频率范围 $(50\pm 1\%)$ Hz;并网变流器侧电感 0.2 mH,滤波电容 60 μ F。

并网变流器轻载时电流谐波问题更为突出。图 4 示出放电功率为 30 kW 时 PCS 的并网电流 i_o 及电网电压 u_a 实测波形。

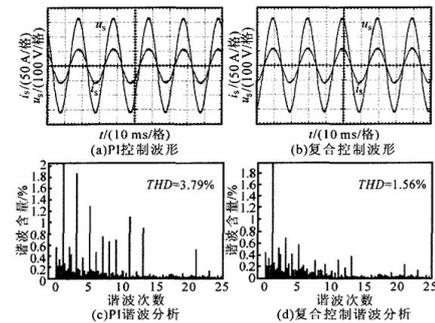


图 4 实测放电波形及谐波分析结果

Fig. 4 The discharge waveforms and harmonic analysis results

图 4a 为单纯 PI 控制下的测试结果,图 4b 为采用复合控制下的测试波形,图 4c,d 分别示出两种控制方法下的谐波分析结果。由实验结果可知两种控制方法下系统都得到良好的稳态控制精度,但 PI 控制的并网电流波形存在一定失真,THD=3.79%,而复合控制方法明显改善了电流波形质量,并网电流 THD 降为 1.56%,谐波分量得到了很好的抑制。

图 5 示出采用复合控制方法的充电电流 i_c 、电压 u_c 波形,可见 PCS 系统充、放电双向运行稳定,并可快速跟踪给定功率指令变化,电流波形畸变小,满足系统控制要求。

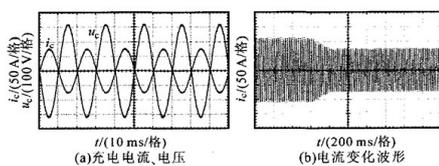


图 5 复合控制下实测波形

Fig. 5 The experimental waveforms with hybrid control

5结论

分析了双向储能变流器的主电路和数学模型.针对由于电网扰动及调制等原因引起并网电流的谐波问题,设计了采用比例积分和重复控制并联的复合控制器,在理论分析基础上,研制了一台100kW双向储能变流器样机.并对比分析了传统比例积分控制与复合控制下样机并网电流实测波形.实验结果验证了所提控制方法能有效抑制双向储能变流器并网电流谐波,能满足双向控制要求,具有较高实用价值。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/91553.html>