

基于小信号分析的电力电子负载动态特性研究

汪 通 林晓焕 郭丹蕊 单 星 麻焕成
(西安工程大学电子信息学院 西安 710048)

摘 要: 电力电子负载(power electronics load, PEL)作为新型电气实验模拟负载装置,不仅可以模拟多种负载装置对电源产品进行多种检验测试,而且能把被测电源设备的能量回馈给电网,是一种绿色环保节能设备。但在恶劣的工况下 PEL 的动态性能与模拟指令电流突变,被测电源(device be tested, DBT)电压突变和电网电压变化有关,为了抑制上述扰动对 PEL 的影响,提出了一种基于功率平衡的前馈控制和基于风电并网的低电压穿越技术。并使用仿真和实验验证前馈控制方法的正确性和有效性。

关键词: 小信号分析;电力电子负载动态特性;低电压穿越;前馈控制

中图分类号: TN349 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4031

Research on the dynamic characteristics of power electronic load based on small-signal analysis

Wang Tong Lin Xiaohuan Guo Danrui Shan Xing Ma Huancheng
(Electronics and Information College, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Power electronic load as a new experimental simulator of electrical load device not only can simulate a variety of load devices for power products to be tested, and also can bring power back to the grid, so it is a green and energy-saving device. However in severe conditions the relationship between PEL dynamic performance and mutation of simulation instruction current, mutation of voltage of DBT, the change of grid voltage is concluded. And the feedforward control strategy based on power balance which is used to restrain the effect of above disturbance on the PEL is put forward. Simulation and experimental results verify the correctness and effectiveness of the control schemes.

Keywords: small-signal analysis; PEL; dynamic performance; LVVRT; feedforward control strategy

1 引 言

在全球能源消费持续增长和总量枯竭的情况下,开发新能源、提高能源的使用效率尤为重要^[1-3]。通用回馈型单相电力电子负载(single power electronics load, SPEL)在此背景下产生。根据有关的行业标准,电源产品在出厂前要进行老化实验和带载静态、动态特性的测试^[4-5]。与传统电阻等耗能元件相比, SPEL 不仅可以模拟多种负载,而且还能工作在多种设定模式,具有控制灵活,节省实验空间等诸多优势。最重要的是 SPEL 能把电能反馈给电网,节约了电能等经济成本。相关学者将大功率电子负载划分为电力电子负载^[6](PEL)并提出通用的主电路结构,即双 H 桥的背靠背结构,包括模拟负载的变换器(load simulation convertor, LSC)和将电能反馈到电网的并网变换器(grid connected convertor, GCC)。采用复合控制策略改进了系统的稳态特性。对三相 PEL 进一步研究,

在控制功率方面有提升。但是,当模拟电流指令突变、电网电压变化和 DBT 扰动等发生时, PEL 会如何响应,响应是否符合设计要求都涉及 SPEL 的动态特性,目前还未得到详尽分析和解决。因此提出采用前馈控制^[7]和低电压穿越技术解决 PEL 的动态特性问题。

2 SPEL 系统结构和动态特性的分析

首先根据系统 LSC 和 GCC 侧功率平衡,建立小信号分析的等效模型^[8-9],如图 1 所示。

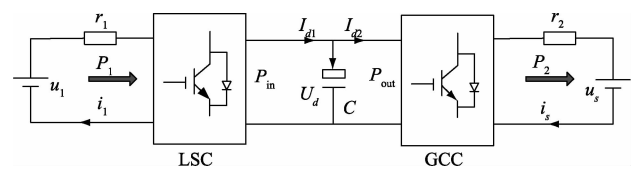


图 1 SPEL 功率平衡等效模型

收稿日期:2015-06

首先要对 PEL 的动态特性定义。文献[9]指出通常情况下,动态特性是指当负载模拟侧指令电流发生突变时,导致系统功率的调整。下面为 SPEL 工作的测试项目:

- 1) 开关机时序测试;
- 2) 突加突减负载测试;
- 3) 电网电压存在扰动时,并网变换器能否按照预期把能量返回;
- 4) 电网电压骤降时,SPEL 能否继续工作。

整个系统的动态调节是 LSC 和 GCC 侧功率不平衡造成的。在稳态时,模拟电流指令变化造成有功功率不平衡,若仅通过 GCC 侧馈网能量的调整,将影响动态响应速度,采用模拟指令前馈可以提高系统响应速度,减少检测项目 1 和 2 造成的影响;工况变化时,如 DBT 电压和电网电压发生波动,采用扰动补偿的前馈控制可以抑制波动或畸变对系统的影响,进而解决测试中的第 3 个问题;电网电压骤降引起并网输出功率受阻,母线电压波动,最终会因过压保护而停机,影响 DBT 正常测试,为解决此问题,引入风电中的 LVRT 来实现 GCC 侧的控制。

从图 1 得到电子电子负载稳态时两侧功率平衡式:

$$\begin{cases} u_{1r}i_{1r} - i_{1r}^2r_{1r} = i_{d1}u_d \\ i_{d2}u_d = u_{2r}i_{2r} + i_{2r}^2r_{2r} \end{cases} \quad (1)$$

$$i_{d1} - i_{d2} = C \frac{du_d}{dt} \quad (2)$$

式中: u_{1r} 、 i_{1r} 为 DBT 电压和电流有效值; u_{2r} 、 i_{2r} 为并网电压和电流有效值;具有能量缓冲作用的电容两侧电流和母线电压分别是 i_{d1} 、 i_{d2} 、 u_d 。扰动存在时,每个参数在稳态点附近产生相应的扰动,得到各个变量为:

$$\begin{aligned} u_{1r} &= U_1 + \Delta u_1 \\ i_{1r} &= I_1 + \Delta i_1 \\ u_{2r} &= U_2 + \Delta u_2 \\ i_{2r} &= I_2 + \Delta i_2 \\ i_{d1} &= I_{d1} + \Delta i_{d1} \\ i_{d2} &= I_{d2} + \Delta i_{d2} \\ u_d &= U_d + \Delta u_d \end{aligned} \quad (3)$$

其中大写字母变量是稳态参数量,“ Δ ”是相应的扰变量。将式(3)代入式(1),舍去高次项可得:

$$\begin{cases} U_1 I_1 + U_1 \Delta i_1 + I_1 \Delta u_1 - I_1^2 r - 2 I_1 \Delta i_1 r = \\ I_{d1} U_d + \Delta i_{d1} U_d + I_{d1} \Delta u_d \\ I_{d2} U_d + \Delta i_{d2} U_d + I_{d2} \Delta u_d = \end{cases} \quad (4)$$

如果各参数变量没有变化,稳态的方程为:

$$\begin{cases} U_1 I_1 - I_1^2 r_1 = I_{d1} U_d \\ I_{d2} U_d = U_2 I_2 + I_2^2 r_2 \\ I_{d1} = I_{d2} \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)可得:

$$(U_1 - 2 I_1 r) \Delta i_1 + I_1 \Delta u_1 - (U_2 - 2 I_2 r) \Delta i_2 - I_2 \Delta u_2 = (\Delta i_{d1} - \Delta i_{d2}) U_d \quad (6)$$

把式(3)代入式(2),由式(5)的第 3 式可知:

$$\Delta u_d = \frac{U_1 - 2 I_1 r_1}{s C U_d} \Delta i_1 + \frac{I_1}{s C U_d} \Delta u_1 - \frac{U_2 + 2 I_2 r_2}{s C U_d} \Delta i_2 - \frac{I_2}{s C U_d} \Delta u_2 \quad (7)$$

令:

$$G_{u1}(s) = \frac{U_1 - 2 I_1 r_1}{U_d}$$

$$G_{u1}(s) = \frac{I_1}{U_d} \quad (8)$$

$$G_{u2}(s) = -\frac{U_2 + 2 I_2 r_2}{U_d}$$

$$G_{u2}(s) = -\frac{I_2}{U_d}$$

则输入交流电流和电压波动、输出交流电流、电压波动分别对直流电压的影响为:

$$\frac{\Delta u_d}{\Delta i_1} = \frac{U_1 - 2 I_1 r_1}{s C U_d} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta u_d}{\Delta u_1} = \frac{I_1}{s C U_d} \quad (10)$$

$$\frac{\Delta u_d}{\Delta i_2} = -\frac{U_2 + 2 I_2 r_2}{s C U_d} \quad (11)$$

$$\frac{\Delta u_d}{\Delta u_2} = -\frac{I_2}{s C U_d} \quad (12)$$

由式(7)可知小信号分析的直流母线电压控制如图 2 所示。可知,对直流电压而言前馈控制消除扰动是可行的。

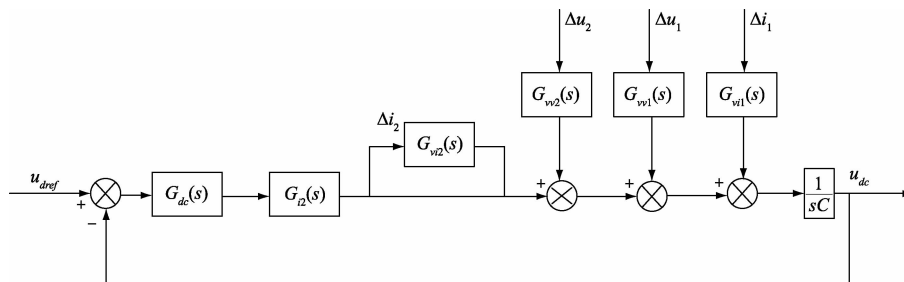


图 2 小信号分析的直流电压控制

3 前馈控制方案分析与实现

忽略其他扰动,分别对单一的扰动分析。

1) 输入电流的前馈控制

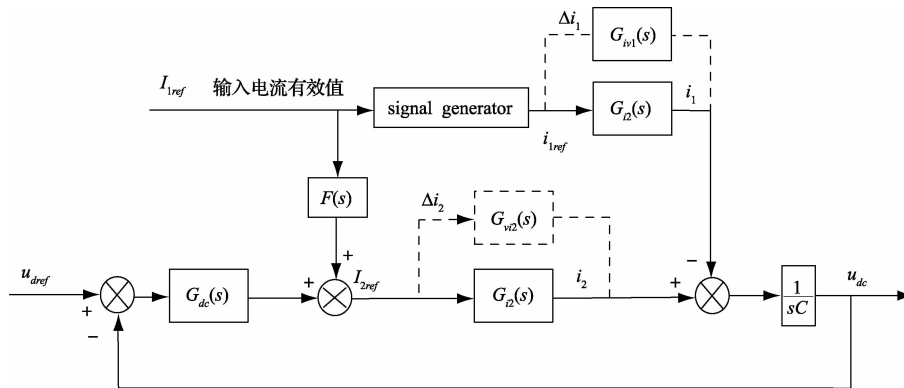


图3 输入电流指令前馈控制

图3中, $F(s)$ 为输入指令电流前馈系数, $G_{i1}(s)$ 为负载模拟变换电流环, $G_{i2}(s)$ 为并网变换电流内环。如果LSC模拟线性负载, $F(s) = U_1 \cos\alpha / U_2$ 其中 α 为阻抗角, $-\pi/2 < \alpha < \pi/2$ 。当 $\alpha = 0^\circ$ 时, LSC模拟纯阻性负载, $F(s) = U_1 / U_2$ 。

2) 并网电压前馈控制

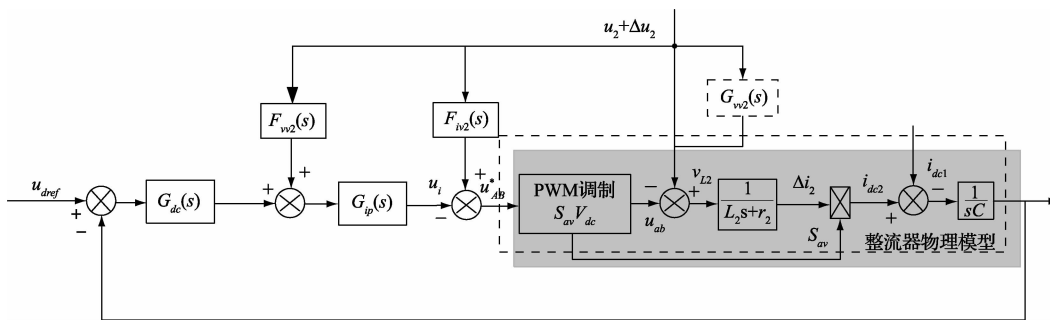


图4 双环中分别采用并网电压前馈方法

S_{av} 为 PWM 调制比, 通常将其等效为一惯性环节, 理想情况下, 调制比可为 1, 则 $F_{v2}(s) = 1$ 。

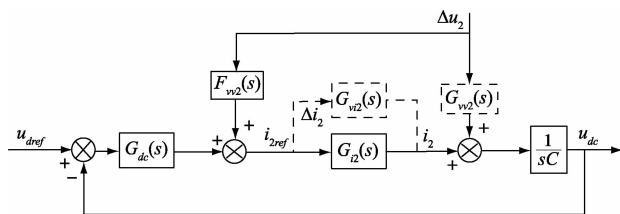


图5 电压环电网电压前馈

输入电流的前馈补偿实质上就是指令电流变化对直流母线电压产生的影响。模拟负载类型差异, 输入指令电流的产生方法也不尽相同。如图3所示为输入电流指令前馈控制。

并网电压的畸变和突变均会导致功率变化, 母线电压波动以及并网电流畸变。而电网电压前馈会对并网电流的准确跟踪和母线电压的稳定调节有益。并网电压不但能对电流环有作用, 也会引起母线电压的波动。故在电流环和电压环均引入并网电压前馈控制, 如图4所示。

把电流控制环简化为惯性环节, 然后把电网电压前馈控制引入电压环, 如图5所示。经过推导 $F_{v2}(s) = -\frac{I_2}{U_2}$ 。

3) DBT 电压前馈控制

DBT 输入电压的变化一定会引起功率的变化, 进而对母线电压造成不利影响。为增强电力电子负载抗扰动能力, 加入 DBT 电压前馈控制, 如图6所示。

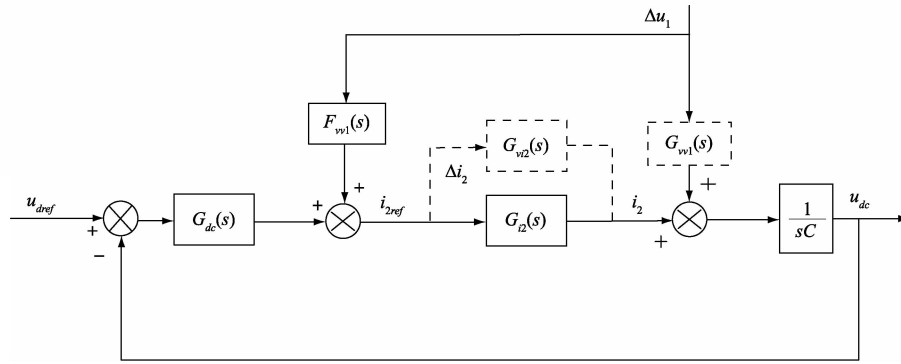


图6 DBT电压前馈控制

采取一种阻抗恒定的方法生成LSC侧电流指令,所以DBT电压的扰动必然引起指令电流的变化。输入电流有效值为 $I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + X^2}}$ 。从而得到DBT电压前馈系数为 $F_{vv1}(s) = \frac{\Delta i_2}{\Delta u_1} = \frac{2U_1}{U_2 \sqrt{R^2 + X^2}}$ 。

从该式可知前馈系数和DBT输入电压的有效值,给定指令的阻抗和电网电压的有效值有关。LSC侧模拟的

恒阻抗会引起DBT电压扰动对SPEL的作用加倍。DBT电压前馈可以减弱此种影响。

4)前馈控制策略的实现

以上全是单一扰动对SPEL的影响分析。当把几种扰动综合处理时,就可得到功率平衡的前馈控制图,如图7所示。综上可知实现控制策略的关键是及时准确地获取扰动量的有效值。

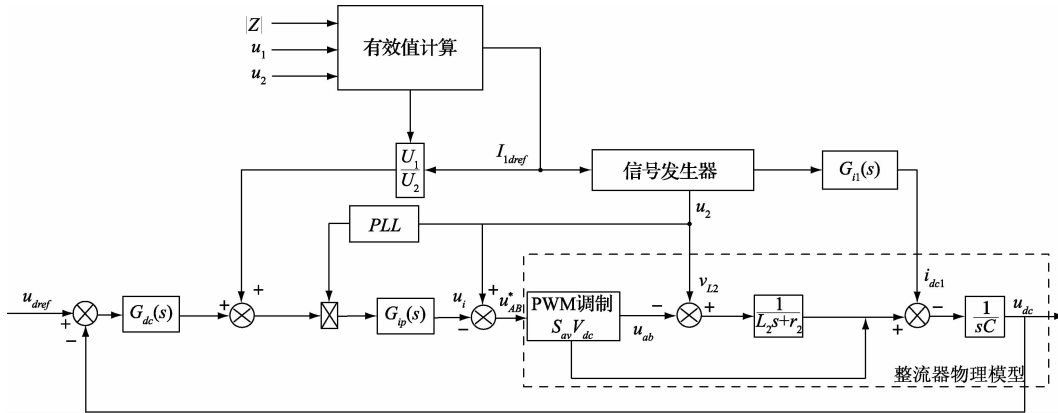


图7 功率平衡的前馈控制的具体实现

4 电网故障应对策略

若电网发生故障,因为保护措施SPEL必然停机。若在故障期间SPEL能自动调整重新正常运行,就实现了无人值守和智能控制的目标。考虑到风电并网的LVRT^[10-11]技术能实现类似功能,故引入LVRT并将其运用到SPEL的控制过程之中。所谓LVRT一般是指并网点电压发生跌落时,风机仍然不停机工作,同时还可以提供支持保证并网点电压维持在一定的幅度,直到并网点电压恢复到正常范围为止,从而“穿越”低电压这段时间范围。参照LVRT指标,给出SPEL的要求,也即系统在并网电压跌至20%时保证不停机运行0.625s,在电网电

压骤降之后2s内又恢复到要求值的90%时,保证SPEL不停机工作。为克服跌落的并网电压恢复导致LSC侧输入电流畸变问题,借鉴滞环控制,提出有功功率平衡的电压滞环控制方案。

电网电压在额定值的范围内时,母线电压稳定在额定的区间内,SPEL工作于正常模式。一旦电网电压发生跌落,系统停止正常工作而进入不停机状态。当并网电压返回到正常时,若此时输入电流指令和并网电流无法及时响应调整到正常值,将会引起母线电压急剧下降到一定数值,进而LSC侧输入电流发生畸变。此时若及时把输入电流指令调整到最大,同时把并网电流参数调整到功率平衡模式,就可以避免输入电流发生畸变。

5 仿真和实验研究

为验证本文控制策略,在 MATLAB 环境下仿真。参数如下: LSC 输入电感为 3 mH,直流母线电容 2 350 μ F, GCC 侧输出电感 3 mH,等效内阻 0.3 Ω ,母线电压为 400 V,额定输入电流有效值 10 A。

首先进行 LSC 侧指令电流前馈控制仿真,如图 8 所示为电流从 10 A 变化到 0 A 再到 10 A 时,加入前馈前后母线电压的波形。加入前馈后,直流母线电压只有微小的波动。

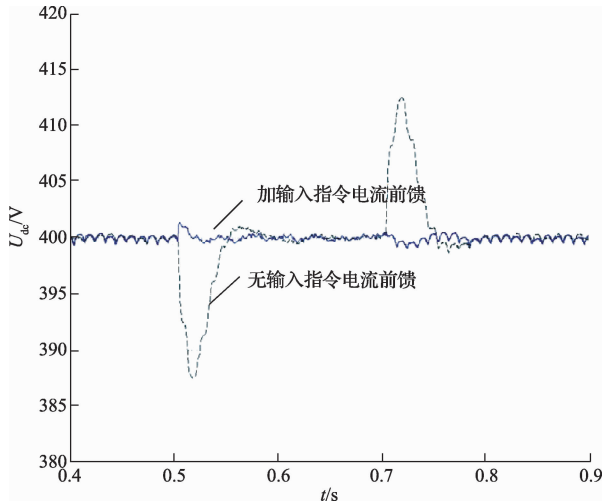


图 8 加入指令电流前馈控制前后母线电压波形

图 9 为并网电压前馈仿真的波形图,当并网电压跌落 20%,0.2 s 后又恢复正常时母线电压变化情况。加入前馈控制响应较快,母线电压波动峰值降低了 20%。

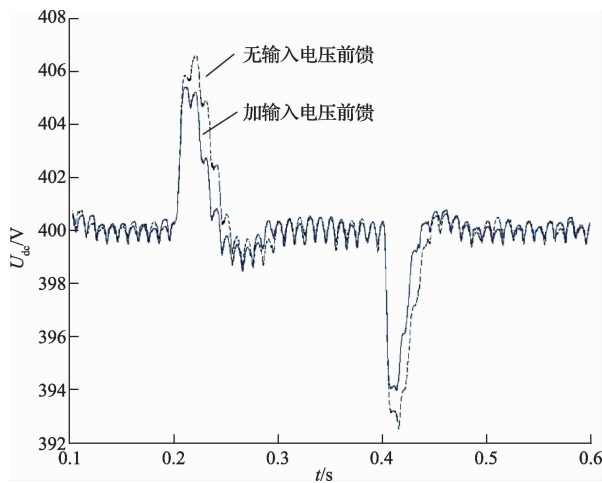


图 9 并网电压跌落又恢复正常时母线电压波形

在样机上进行实验,图 10 为 LSC 引入复合控制, GCC 侧加入均值滤波和比例谐振 (proportion resonance, PR) 控制, SPEL 模拟的负载为阻性, LSC 电流指令从 0 突

变至 10 A, GCC 从整流状态到逆变状态的变化过程。表明系统能够较好应对系统的动态变化。

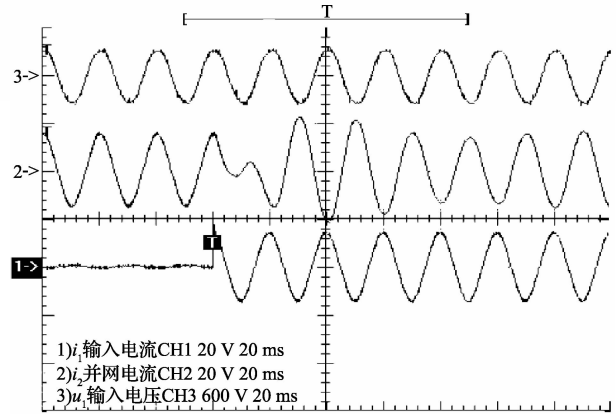
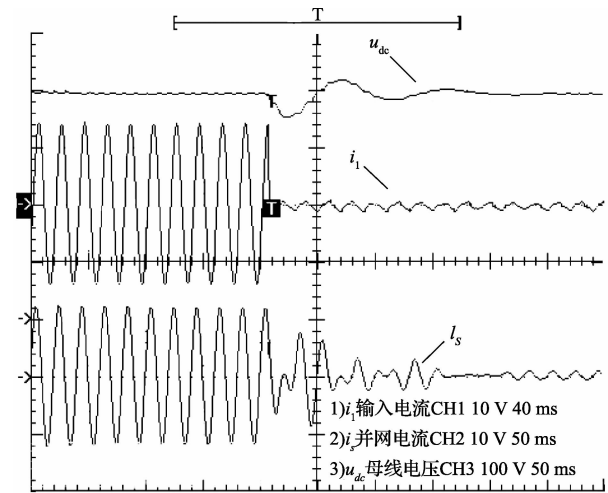
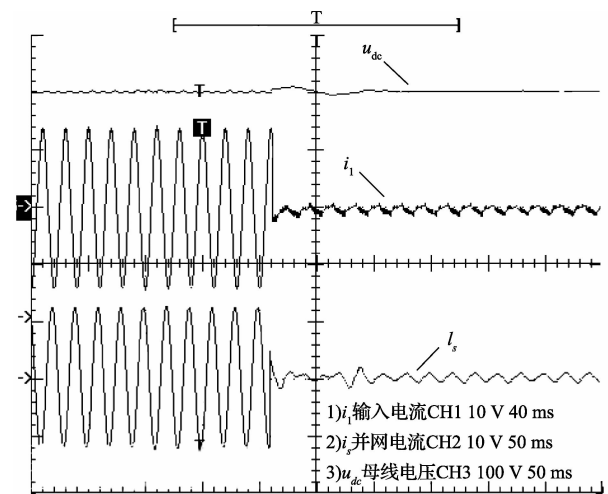


图 10 并网逆变侧从整流到逆变工况



(a)未加前馈



(b)加前馈控制

图 11 输入电流指令突变负载加入前馈前后波形的对比

由图 11(a)可知,前级加入串联复合控制,后级引入的控制方法导致系统响应变慢,但前馈控制的引入基本消除了不利影响,图 11(b)表明母线电压在指令突降时未发生较为明显的变化,与前文分析一致,说明所采用的控制方案是准确可靠的。

6 结 论

针对电力电子负载的动态特性,提出了考核的测试项目并实现。并提出采用小信号分析的前馈控制方法。分别对 DBT 输入电压和电流指令的变化,并网电压的扰动进行分析,得到模拟恒阻抗时 DBT 电压的扰动对系统的影响加倍,加入指令电流前馈基本消除指令电流突变对系统的影响。为解决并网电压跌落时的问题,引入风电的 LVRT 技术,解决穿越过程中的问题,在功率平衡的基础上采用电压滞环控制方法。综合采用改进的控制策略后,仿真和实验的结果表明所采用控制策略的正确性和有效性,对于电力电子负载性能的提升有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 江泽民. 对中国能源问题的思考[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(3): 345-359.
- [2] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [3] SONG A G, ZENG H, YANG R H, et al. Fundamental problems in rehabilitation robots based on neuro-machine interaction[J]. Instrumentation, 2014, 1(3):

1-16.

- [4] 李芬. 单相背靠背绿色节能试验系统关键技术的研究[D]. 武汉, 华中科技大学, 2010.
- [5] 潘少军, 李旭杰, 沈松. 支持云智慧技术的动态信号智能传感器研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(10): 1-5.
- [6] 王成智. 单相电力电子负载研究与设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [7] 张春雷, 刘健, 王绍治, 等. 前馈控制算法校正相移微动台非线性运动[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(8): 879-884.
- [8] 张国光. 基于 DDS 的高精度多路信号发生系统研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(4): 125-129.
- [9] 瞿博, 吕征宇. 三相电压型 PWM 整流器小信号建模及其控制器设计[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 103-108.
- [10] 张兴, 张龙云, 杨淑英, 等. 风力发电低电压穿越技术综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(2): 1-8.
- [11] 吴忠强, 庄述燕, 韩延光. 直驱永磁风电系统能量成形与最大风能捕获[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 344-351.

作 者 简 介

汪通, 1988 年出生, 硕士研究生。研究方向为电力电子功率控制及新能源并网技术。
E-mail: wangtongok@126.com