

# 自适应 PI 控制的双馈变流器高电压穿越工况研究

韩永豪, 聂满仓

(许昌许继风电科技有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 针对电网高电压条件, 分析了双馈变流器的数学模型, 推导出电压骤升下双馈电机的定子磁链与转子电压分量。提出一种新型高电压穿越方案, 网侧变流器发出感性无功; 转子采用自适应 PI 控制器。在电网电压正常时设置带宽较小的 PI 参数, 以获得较好的电能质量; 在故障时刻设置带宽较大的 PI 参数, 以获得较快的动态响应。仿真研究与样机测试均表明, 所提方案具有较好的动态效果, 能够实现高电压穿越功能。

**关键词:** 变流器; 双馈变流器; 高电压穿越; 自适应

**Abstract:** For high voltage conditions of power grid, the mathematical model of doubly-fed converter is analyzed, and the stator flux component and the rotor voltage are derived. A novel high voltage ride-through control strategy is proposed, that is, the grid-side converter produces reactive power and the rotor-side converter uses adaptive PI controller. When the grid voltage is normal, the smaller bandwidth PI is used to obtain a better power quality. When the grid voltage is high, the larger bandwidth PI is used to obtain a fast dynamic response. Simulation and prototype test show that the proposed scheme has good dynamic effect and can achieve the high voltage ride-through function.

**Key words:** converter; doubly-fed converter; high voltage ride-through; adaptive

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)01-0047-04

## 0 引言

目前, 风电装机容量居于世界第一, 但由于风电场多采用集中式大规模分布, 其发电效率低、电能质量差容易引起电网波动。例如, 对普遍存在低电压穿越(low voltage ride-through, LVRT)现象, 风电场常采用投入 FC、SVC、SVG 等无功补偿装置, 但现有的无功补偿装置控制精度较差会引起无功过剩, 导致电压恢复时产生过电压现象。

针对高电压穿越技术(high voltage ride-through, HVRT), 国外已有完整的标准, 如澳大利亚 AEM、加拿大 AESO、爱尔兰 EIRGRID、丹麦 Energinet.dk。它们在低电压穿越、高电压穿越等方面都有详细的标准规范和技术要求<sup>[1]</sup>。

国内并没有关于 HVRT 的国家统一标准, 如 GB/T 19963-2011《风电场接入电力系统技术规定》只有低电压穿越(LVRT)的相关标准, 没有 HVRT 的具体标准。国内的冀北电科院提出了一些 HVRT 标准, 并在 2013 年 1 月针对金风科技做了首次的 HVRT 测试工作, 但只是个案测试, 不能成为行业标准。

对双馈变流器, HVRT 技术集中在两种方向: 一是改进硬件方案, 通过转子侧增加主动式 Crowbar、直流侧增加 DC Chopper, 来实现对过压时的能量泄放<sup>[2]</sup>; 二是通过改进软件算法, 对网侧变流器进行吸收过剩无功控制, 对机侧变流器进行控制参数优化。文献[3]提出了机侧虚拟阻抗的控制方案, 可加速转子直流量衰减, 但文献[4]指出虚拟阻抗方案效果有限, 难以抑制转子侧的过流。目前, HVRT 下转子侧交直流分量的振荡抑制仍是难题。

于是提出一种新型的 HVRT 方案: 1) 在网侧发出感性无功, 保持直流母线电压的稳定; 2) 在机侧设计自适应 PI 控制器动态调节 PI 参数, 加快因定子磁链突变产生的转子交流分量衰减; 3) 硬件上采用主动式 Crowbar、直流 Chopper, 来实现对过压时的能量泄放。

Matlab 仿真验证了所提方案的有效性, 为实际应用提供了参考依据。

## 1 双馈变流器的高电压穿越模型

### 1.1 双馈变流器网侧 HVRT 模型

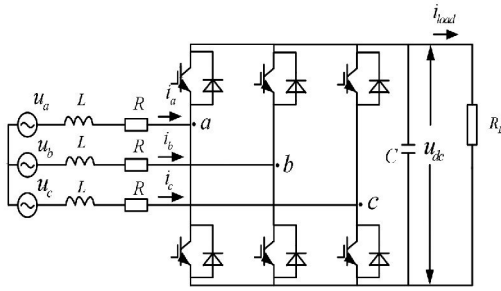


图 1 网侧变流器的等效电路图

将同步旋转坐标系的  $d$  轴定向于电网电压矢量  $u_g$  的方向上  $u_m$  为电网电压的幅值,电网电压的  $d-q$  分量为

$$\begin{cases} u_{gd} = u_m \\ u_{gq} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

输入电流满足

$$\begin{cases} L \frac{di_{ds}}{dt} = -Ri_{ds} + \omega_g Li_{qs} + u_m - u_{ds} \\ L \frac{di_{qs}}{dt} = -Ri_{qs} - \omega_g Li_{ds} - u_{qs} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $u_{ds}$ 、 $u_{qs}$  为整流器交流侧电压的  $d-q$  轴分量;  
 $i_{ds}$ 、 $i_{qs}$  为电流<sup>[5-7]</sup>。

上式表明  $d$ 、 $q$  轴电流除受控制量  $u_{ds}$ 、 $u_{qs}$  的制约外,还受交叉耦合项  $\omega_g Li_{qs}$ 、 $\omega_g Li_{ds}$  和电网电压的影响。

采用电压空间矢量 SVPWM 调制理论,调制比  $m$  满足

$$m = \sqrt{u_{ds}^2 + u_{qs}^2} / u_{dc} \leq 1/2 \quad (3)$$

当系统进入稳态时  $L \frac{di_{ds}}{dt} = 0$   $L \frac{di_{qs}}{dt} = 0$ ,并忽略进线电阻  $R_g$  上的压降,则由式(2)、式(3)可得

$$u_{dc} \geq 2 \sqrt{(u_m + \omega_g Li_{qs})^2 + (-\omega_g Li_{ds})^2} \quad (4)$$

式(4)给出了网侧变流器进入稳态后直流母线电压、电网相电压峰值、进线电感以及负载电流间的关系。

HVRT 期间  $u_m$  升高,为保持直流母线电压  $u_{dc}$  的稳定控制,可利用进线电抗进行分压,即网侧变流器输出一定的感性无功电流  $I_{qs}$ 。

根据式(4)可得出网侧变流器正常工作时,其无功电流最小值、电网相电压峰值、有功电流间的关系为

$$I_{d\min} = \frac{1}{\omega_g L} [\sqrt{u_{dc}^2/4 - (-\omega_g Li_{ds})^2} - u_m] \quad (5)$$

### 1.2 双馈变流器机侧 HVRT 模型

采用定子磁链定向矢量控制技术,对双馈发电机的模型进行分析。由于兆瓦级发电机的定转子电阻很小,为简化分析忽略其定转子电阻的影响。

在电网电压正常时,定子磁链  $\psi_s$  恒定,忽略定子电阻,稳态定子磁链矢量可表述为

$$V_{sdq} = j\omega_s \psi_{sdq} \quad (6)$$

忽略转子电阻项,稳态时双馈发电机的反电动势与转子滑差  $\omega_{slip}$  成正比。

$$E_{dq} = j\omega_{slip} \frac{L_m}{L_s} \psi_{sdq} \quad (7)$$

在电网电压发生过电压骤升瞬间,定子磁链不会像电网电压一样突变并产生直流分量。该直流分量在  $d-q$  同步旋转坐标系下变为交流扰动项,并以定子磁链时间常数衰减。

电网突变前后正序同步旋转坐标系下的定子磁链方程为

$$\psi_{sdq}(t) = \begin{cases} \psi_{sdq0} = \frac{V_{sdq0}}{j\omega_s} & t < t_0 \\ \psi_{sdq2} + (\psi_{sdq0} - \psi_{sdq2}) e^{-\sigma t} e^{-j\omega_s t} & t > t_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中  $\psi_{sdq0}$ 、 $V_{sdq0}$  分别为电压骤升前的定子磁链与定子电压; $\psi_{sdq2}$ 、 $V_{sdq2}$  为电压突变稳态后的定子磁链与定子电压; $\sigma$  为定子磁链时间常数。

忽略定子电阻项,转子电流环中反电动势可表述如式(9)。

$$E_{dq}(t) = \frac{L_m}{L_s} [j\omega_{slip} \psi_{sdq0} - j\omega_{slip} (\psi_{sdq0} - \psi_{sdq2}) \varepsilon(t) - j\omega_r (\psi_{sdq0} - \psi_{sdq2}) e^{-\sigma t} e^{-j\omega_s t} \varepsilon(t)] \quad (9)$$

电网电压突变后,反电动势分量由三项组成。

1) 第一项对应的是电网电压稳态情况的定子磁链,其幅值很小。

2) 第二、三项是在电网电压突变下产生的,其中第三项在转子  $d-q$  同步旋转坐标系中为振荡衰减项,由于电网电压突变下反电动势的幅值很大,其感应的转子电流、电压的幅值也较大。

通常情况下直流项的衰减较快。若定子磁链时间常数较小,振荡项衰减较慢,转子电流动态性能较差。

## 2 双馈变流器的高电压穿越方案

为高电压穿越,采用图 2 的硬件方案,其中转子

侧采用 Crowbar, 直流侧采用 Chopper。

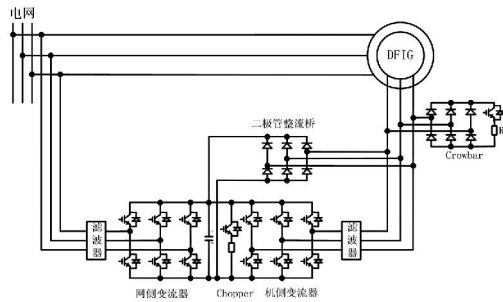


图 2 双馈变流器的电路图

### 2.1 双馈变流器网侧 HVRT 方案

由公式 (5) 可得无功电流的最小值为

$$I_{qsmin} = \frac{1}{\omega_g L} [\sqrt{u_{dc}^2/4 - (-\omega_g L I_{ds})^2} - u_m]$$

考虑动态过程  $I_{ds}$  的突变, 无功电流应至少为

$$I_{qs}^* = \frac{1}{\omega_g L} [u_{dc}/2 - u_m] \quad (10)$$

为完成较大的感性无功出力, 在 1.15 p. u. 高压时, 统一按网侧基准电流 0.5 p. u. 发出感性无功。

### 2.2 双馈变流器机侧 HVRT 方案

以下设计自适应 PI 调节器<sup>[8, 9]</sup>, 在转子电流交流分量振荡较大的情况下, 增大 PI 参数, 在电压恢复正常后恢复 PI 参数。

当电网电压稳定时, 转子电压与电流的关系为

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + L_r \frac{di_{dr}}{dt} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + L_r \frac{di_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (11)$$

其中  $u_{dr}$ 、 $u_{qr}$  为转子电压电流;  $R_r$ 、 $L_r$  为等效电阻电感。

传递函数为  $G(s) = \frac{1}{R_r + L_r s}$

由公式 (9) 可见, 当电网骤升故障过程中,  $u_{dr}$ 、 $u_{qr}$  中含有转子交流振荡项, 其频率为定子电压在转子  $d-q$  同步坐标系下的频率, 即频率为  $f_{r1} = 50 \pm f_{ri}$ 。

其中  $f_{r1}$  为转子交流振荡电流频率,  $f_{ri}$  为转子电流基波频率。

考虑了转子交流振荡电流的转子电压与电流的公式为

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + L_r \frac{di_{dr}}{dt} + f(i_{dr1}) \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + L_r \frac{di_{qr}}{dt} + f(i_{qr1}) \end{cases} \quad (12)$$

其中  $f(i_{dr1})$ 、 $f(i_{qr1})$  作为交流扰动项, 扰动项与转子电流的传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{1 + f(\sigma)s} \quad (13)$$

考虑  $i_{dr1}$ 、 $i_{qr1}$  为频率为  $50 \pm f_{ri}$  的交流分量, 故可通过动态调节 PI 的积分增益使其截止频率高于  $f_g \pm f_{ri}$ , 达到快速衰减的目的。

具体实现过程是, 动态监测电网电压: ①当电网电压正常时, 设定带宽小于 PI 参数  $f_{ri}$  的积分项, 以获得电能质量较好的转子电流。②当电网电压骤升时, 设定带宽小于  $f_g \pm f_{ri}$  的 PI 参数, 以获得较快的动态穿越效果。

## 3 仿真分析

### 3.1 仿真参数

双馈变流器系统参数如下。

电网线电压 690 kV (RMS), 频率 50 Hz, 适用于额定功率 2 MW 的双馈电机。

网侧变流器 LCL 滤波器  $L_g = 0.4$  mH,  $L_{con} = 0.2$  mH,  $C = 60$   $\mu$ F。直流母线电容  $C_1 = 12$  mF,  $U_{dc}$  电压指令  $U_{dc}^* = 1100$  V。电流标么基准值  $I_e = 310$  A (RMS)。开关频率 2500 Hz。

转子进线电抗 0.06 mH, 电流标么基准值  $I_e = 650$  A (RMS)。开关频率 2500 Hz。

### 3.2 仿真分析结果

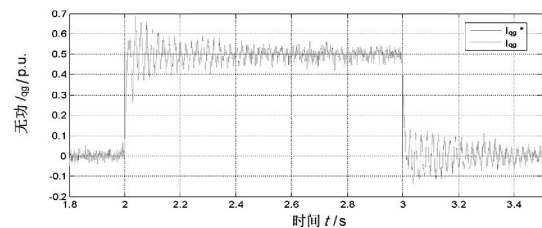


图 3 网侧无功指令与反馈分量

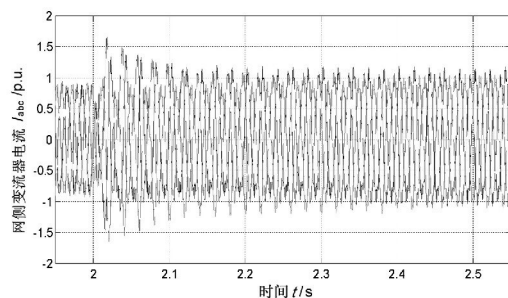


图 4 网侧三相电流波形

图 3、图 4 显示 2~3 s, 电压处于 1.15 p. u 高

压时,网侧变流器输出0.5 p. u. 的无功电流分量,网侧变流器的交流分量显著上升,此时需要放大网侧过流保护值。

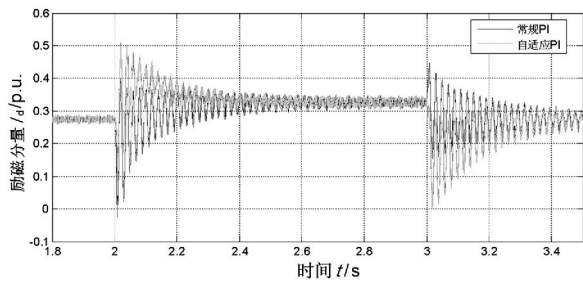


图5 常规PI与自适应PI对比(机侧励磁电流分量)

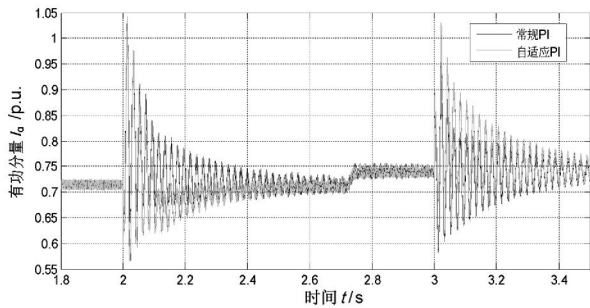


图6 常规PI与自适应PI对比(机侧有功电流分量)

图5、图6显示,采用常规PI,转子电流d-q分量在过电压穿越过程中,出现交流振荡电流,其频率为70 Hz。采用自适应PI控制器,明显加快了交流振荡项的衰减时间,并且振荡幅值大幅减小,说明所设计的自适应PI控制器效果较佳。

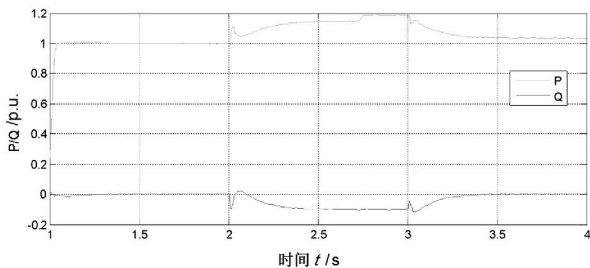


图7 机组总功率波形

图7中2~3 s发生1.15 p. u. 过电压,由于网侧输出了感性无功电流,机组总无功出现-0.12 p. u. 的感性无功。由于转子有功电流保持稳定,机组总有功达到1.2 p. u. 左右,这对变流器的硬件是一种考验。

## 4 结论

针对风场电网高电压的恶劣工况,对双馈变流器的高电压穿越技术做了详细研究。

通过分析 HVRT 暂态过程,提出一种新型高电

压穿越方案,网侧变流器发出感性无功;转子采用自适应PI控制器,在电网电压正常时设置带宽较小的PI参数,以获得较好的电能质量,在故障时刻设置带宽较大的PI参数,以获得较快的动态响应。

通过仿真分析,所提方案完全能够实现1.15 p. u. 过电压工况下的高电压穿越功能,显示了良好的动态响应效果。

## 参考文献

- [1] 刘雪菁,朱丹,宋飞,等. 风电机组高电压穿越技术研究[J]. 可再生能源, 2013, 31(11): 34-38.
- [2] 徐海亮,章玮,陈建生,等. 考虑动态无功支持的双馈风电机组高电压穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 112-119.
- [3] 谢震,张兴,杨淑英,等. 基于虚拟阻抗的双馈风力发电机高电压穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27): 16-23.
- [4] 曲庭余. 双馈风力发电机高电压穿越技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [5] 张崇巍,张兴. PWM整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [6] Abeyasekera T, Johnson C M, Atkinson D J, et al. Suppression of Line Voltage Related Distortion in Current Controlled Grid Connected Inverters[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(6): 1393-1401.
- [7] Yazdani A, Iravani R A. Generalized State-space Averaged Model of the Three-level NPC Converter for Systematic DC-voltage-balancer and Current-controller Design[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1105-1114.
- [8] Luo An, ShuaiZhikang, ZhuWenji, et al. Development of Hybrid Active Power Filter Based on the Adaptive Fuzzy Dividing Frequency-Control Method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 424-432.
- [9] 陈新海. 自适应控制及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2003.

作者简介:

韩永豪(1987),本科,工程师,研究方向为大功率变流器技术;

聂满仓(1985),硕士,工程师,研究方向为大功率变流器技术。

(收稿日期:2014-09-17)