



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102522768 B

(45) 授权公告日 2013. 11. 06

(21) 申请号 201110389094. 2

(22) 申请日 2011. 11. 30

(73) 专利权人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市咸宁西路 28 号

(72) 发明人 杨黎晖 许昭 马西奎

(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任公司 61200

代理人 陆万寿

(51) Int. Cl.

H02J 3/38 (2006. 01)

H02J 3/18 (2006. 01)

H02J 3/28 (2006. 01)

H02P 9/04 (2006. 01)

(56) 对比文件

WO 00/74198 A1, 2000. 12. 07,

GB 2419043 A, 2006. 04. 12,

CN 101499664 A, 2009. 08. 05,

胡家兵, 贺益康. 双馈风力发电系统的低压穿越运行与控制. 《电力系统自动化》. 2008, 第 32 卷 (第 2 期), 第 49-52 页.

杨黎晖, 马西奎. 双馈风电机组对电力系统低频振荡特性的影响. 《中国电机工程学报》. 2011, 第 31 卷 (第 10 期), 第 19-25 页.

审查员 马肃

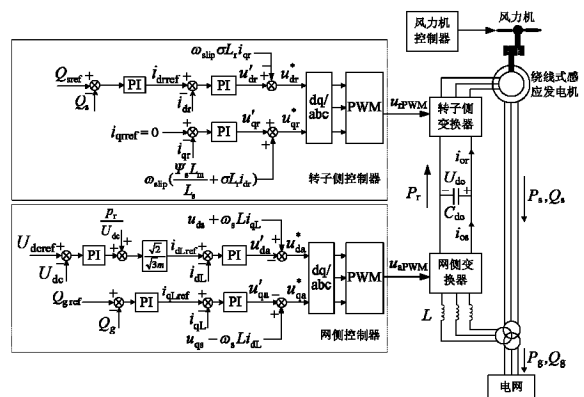
权利要求书1页 说明书5页 附图5页

(54) 发明名称

一种双馈风力发电机组低电压穿越控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种双馈风力发电机组低电压穿越控制方法, 包含转子侧和网侧变换器的控制。其技术方案是: 在故障时, 转子侧变换器通过限制发电机转矩电流的方式控制发电机转子加速运行, 将由电网电压骤降引起的风电机组中的不平衡能量转换成转子的动能, 从而减小发电机定、转子回路中的过电流; 网侧变换器的直流侧电压控制环中加入反映转子功率和直流电压波动的前馈补偿量, 从而平衡转子功率的瞬时波动, 减小直流侧的过电压。本发明无需增加硬件装置, 实现简单, 可靠性高, 可有效提高双馈风力发电机组的低电压穿越能力, 并能在电网故障期间保持发电机组对输出有功和无功功率的控制。



1. 一种双馈风力发电机组低电压穿越控制方法,包括转子侧控制器和网侧控制器的协调控制,其特征在于:

(1) 检测双馈风力发电机组的并网点电压、定子电流、转子电流和交-直-交变换器的直流侧电压;

(2) 当检测到发电机并网点电压、定子电流、转子电流和变换器直流侧电压中的任意一个值达到限制值时,转子侧控制器切换到故障运行模式;且转子侧控制器在故障运行模式时的控制方法为:取消有功功率外环,将转矩电流的参考值  $i_{qref}$  设定为 0,使得发电机转子加速运行,将由电网电压骤降引起的风电机组中的不平衡电能转换为发电机转子的动能,从而减小发电机定、转子回路中的过电流;待故障切除后,转子侧控制器又切换到正常运行模式,即由有功功率外环 PI 控制器的输出作为转矩电流的参考值  $i_{qref}$ ,则故障时转换的动能又能转换为电能柔性释放至电网;

(3) 当检测到发电机并网点电压、定子电流、转子电流和变换器直流侧电压中的任意一个值达到限制值时,网侧控制器切换到故障运行模式;且网侧控制器在故障运行模式时的控制方法为:在网侧变换器的直流侧电压外环 PI 控制器输出信号中加入反映转子功率  $P_r$  和直流侧电压  $U_{dc}$  波动的前馈补偿量  $P_r/U_{dc}$ ,从而平衡转子功率的瞬时波动,减小变换器直流侧的过电压;待故障切除后,转子侧控制器又切换到正常运行模式,即直流侧电压外环 PI 控制器的输出信号中不再加入前馈补偿量  $P_r/U_{dc}$ ;

(4) 当检测到故障切除后,转子侧和网侧变换器立即切换到正常运行模式。

## 一种双馈风力发电机组低电压穿越控制方法

### 技术领域：

[0001] 本发明属于风力发电机组运行控制领域，具体涉及一种在电网电压骤降故障时保障并提高双馈风力发电机组低电压穿越能力的控制方法。

### 背景技术

[0002] 双馈风力发电机组以其独特的技术优势在中大功率风力发电机组中得到了广泛的应用。随着越来越多的风力发电机组接入电网，新的风电并网导则都要求当电网发生故障时并网风电机组仍能保持不脱网运行，并在故障切除后风电机组能迅速恢复正常运行，即要求风电机组能实现低电压穿越运行。

[0003] 电网故障引起的风机并网点电压跌落会使风力发电机产生的功率无法完全输出到电网，从而给双馈风力发电机组带来两大方面的影响，一是在发电机定、转子回路中产生过电流，二是引起电力电子变换器直流侧的过电压。由于双馈风力发电机组中的电力电子变换器与全功率风电机组的变换器相比功率等级较小，所以低电压穿越问题是双馈风力发电机组设计控制技术的重要挑战，直接关系到风电渗透下的电力系统的稳定性。

[0004] 目前，转子短路保护技术 (Crowbar) 和在变换器的直流侧并联卸荷电路是一种比较常用的低电压穿越控制方法。该方法在电网故障时，切除发电机转子的励磁电源，通过转子旁路保护电阻释放能量从而减小转子回路的过电流，同时在直流侧电容旁并联卸荷电阻以减小直流侧电压的波动。在该方法的基础上，专利号为 CN201010033770.8，专利名为“低电压穿越控制方案”的专利、专利号为 CN201020518673.3，专利名为“双馈型风力发电机组低电压穿越变频控制系统”的专利和专利号为 CN201020509839.5，专利名为“一种应对电网电压短时间跌落的风力发电机组防护装置”的专利，提出了一些改进的转子短路保护技术以提高双馈风电机组的低电压穿越能力。但这些方法仍存在以下不足：①需要增加新的硬件保护装置，从而增加了系统的成本，降低了系统的可靠性。②在故障时中断了转子侧变换器对发电机有功、无功功率的控制。③故障时发电机作传统的感应电机方式运行，会从电网吸收无功功率，影响电网的电压稳定性。

[0005] 针对转子短路保护技术存在的问题，很多纯软件的控制方法在不改变硬件系统结构的基础上，采用先进的控制算法通过人工智能修改控制策略，以提高双馈风力发电机组的低电压穿越性能。但这些控制算法通常由于过于复杂而不适合工业应用，并且由于这些算法通常依赖于对某些系统参数的评估和控制参数的设计因而缺乏鲁棒性。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的在于提出一种在电网电压骤降故障时双馈风力发电机组低电压穿越控制方法。该控制方法通过转子侧和网侧变换器的协调控制，减小发电机定、转子回路中的过电流和变换器直流侧的过电压，提高双馈风力发电机组的低电压穿越能力，并能在电网故障期间保持发电机组对输出有功和无功功率的控制。本发明无需增加硬件装置，系统实现简单，可靠性高，实用性强。

[0007] 本发明的技术方案是这样实现的,一种双馈风力发电机组低电压穿越控制方法,该方法基于具有电压源型交-直-交 PWM 变换器的双馈风电机组,该风电机组包括风力机,风力机通过齿轮箱与发电机转子轴连接,控制器包括风力机控制器、转子侧控制器和网侧控制器,风力机控制器的作用是实现最大风能追踪控制以及在高风速和高转速时限制风能的输入,转子侧控制器和网侧控制器分别采用基于定子磁链定向和基于电网电压定向的矢量控制技术控制有功和无功功率,其特征在于:

[0008] 当电网发生故障使双馈风力发电机定子电压跌落时,发电机产生的有功功率无法完全输出到电网,多余的能量使发电机的定子、转子产生过电流以及交-直-交变换器的直流侧产生过电压。当检测到双馈风力发电机组的并网点电压、定子电流、转子电流和变换器的直流侧电压中的任意一值达到限制值时,双馈风力发电机组的转子侧和网侧变换器立即由正常运行模式切换到故障运行模式。

[0009] 在故障运行模式下,转子侧变换器通过限制发电机转矩电流的方式控制发电机转子加速运行,将由电网电压骤降引起的风电机组中的不平衡能量转换成转子的动能,从而减小发电机定、转子电流的波动。

[0010] 在故障运行模式下,网侧变换器的直流侧电压控制环中加入反映转子功率  $P_r$  和直流侧电压  $U_{dc}$  波动的前馈补偿量  $P_r/U_{dc}$ ,从而平衡转子功率的瞬时波动,减小直流侧的过电压。

[0011] 当检测到故障切除后,转子侧和网侧变换器立即切换到正常运行模式。

[0012] 本发明提出的双馈风力发电机组低电压穿越控制方法具有如下的技术特点:

[0013] 1、完全依靠控制实现,不要求传统标准的双馈风力发电机组增加其他硬件装置。能提高系统的可靠性、降低系统的成本。

[0014] 2、将故障时系统中的不平衡能量转换为发电机转子的动能,待故障切除后此动能又能转换为电能柔性释放至电网。

[0015] 3、即使在电网电压骤降为 0 伏时,网侧变换器在故障运行模式中加入的前馈补偿量仍能抑制直流侧电压的瞬时波动。

[0016] 4、在故障时维持变换器与发电机的连接,保持对输出有功和无功功率的控制。

#### 附图说明

[0017] 图 1 是正常运行情况下双馈风电机组的控制框图。

[0018] 图 2 是电网故障时双馈风电机组的控制框图。

[0019] 图 3 是当公共连接点 (PCC) 电压跌落为 0 伏并且故障持续时间为 150ms 时,采用传统的转子短路保护技术和在变换器直流侧并联卸荷电路所得到的双馈风电机组的运行效果。

[0020] 图 4 是当公共连接点 (PCC) 电压跌落为 0 伏并且故障持续时间为 150ms 时,采用本发明方法所得到的双馈风力发电机组的运行效果。

[0021] 图 5 是当公共连接点 (PCC) 电压跌落至额定值的 15% 并且故障持续时间为 625ms 时,采用传统的转子短路保护技术和在变换器直流侧并联卸荷电路所得到的双馈风电机组的运行效果。

[0022] 图 6 是当公共连接点 (PCC) 电压跌落至额定值的 15% 并且故障持续时间为 625ms

时,采用本发明方法所得到的双馈风力发电机组的运行效果。

### 具体实施方式

[0023] 双馈风力发电机组及其在正常运行情况下的控制结构如附图 1 所示。双馈风力发电机组主要由风力机、绕线式感应发电机、三相交-直-交 PWM 变换器和控制器组成。风力机通过齿轮箱与发电机转子连接带动发电机转动,发电机的转速为  $\omega_r$ 。绕线式感应发电机的定子连接电网,定子电压矢量为  $u_s$  (分解后可得到 d-q 旋转坐标系下的分量  $u_{ds}$  和  $u_{qs}$ ),通过定子流向电网的有功和无功功率分别为  $P_s$  和  $Q_s$ 。发电机的转子通过交-直-交 PWM 变换器实现交流励磁,转子电压、电流矢量分别为  $u_r$  (分解后可得到 d-q 旋转坐标系下的分量  $u_{dr}$  和  $u_{qr}$ ) 和  $i_r$  (分解后可得到 d-q 旋转坐标系下的分量  $i_{dr}$  和  $i_{qr}$ ),转子回路有功功率为  $P_r$ 。双馈风电机组流向电网的有功和无功功率分别为  $P_g$  和  $Q_g$ ,风电机组并网点电压为  $U_t$ 。三相交-直-交变换器包括两个独立控制的电压型变换器:转子侧变换器和网侧变换器,两个变换器之间并联电容  $C_{dc}$ ,直流侧电容电压为  $U_{dc}$ ,网侧变换器电感电流矢量为  $i_l$  (分解后可得到 d-q 旋转坐标系下的分量  $i_{dl}$  和  $i_{ql}$ )。控制器包括风力机控制器、转子侧控制器和网侧控制器。风力机控制器通过为转子侧控制器提供有功功率指令  $P_{gref}$  来实现最大风能追踪控制,并且在风速或风力机转速超过额定值时通过调节桨距角  $\beta$  限制风能的输入。转子侧控制器和网侧控制器主要控制发电机组向电网输出的有功和无功功率。

[0024] 为实现发电机有功功率(电磁转矩和转速)和无功功率(转子励磁电流)的解耦,转子侧变换器采用基于定子磁链定向的矢量控制,即以定子磁链  $\psi_s$  的方向作为转子侧变换器矢量控制参考坐标系的 d 轴方向。有功、无功功率控制环(外环)和电流控制环(内环)均采用 PI 调节器。为实现网侧变换器与电网之间流动的有功和无功功率的解耦,网侧变换器采用基于电网电压定向的矢量控制,即以电网电压  $u_s$  的方向作为网侧变换器矢量控制参考坐标系的 d 轴方向。直流侧电压、无功功率控制环(外环)和电流控制环(内环)均采用 PI 调节器。

[0025] 在电网故障情况下,本发明提出的双馈风力发电机组低电压穿越控制框图如附图 2 所示。

[0026] 当电网发生故障时,故障会引起发电机定子电压跌落,发电机产生的有功功率无法完全输出到电网,多余的能量使发电机的定子、转子回路产生过电流。因此从能量平衡的角度考虑,减小发电机定、转子过电流的方法就是减小发电机组中的不平衡能量。本发明提出的低电压穿越控制方法,其转子侧控制器的核心思想就是在故障时控制发电机加速运行,将发电机组中的不平衡能量转换成发电机转子的动能。

[0027] 发电机转子的运动方程为

$$[0028] \quad \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H_g} (T_{sh} - T_e - B\omega_r)$$

[0029] 式中,  $H_g$  为发电机的惯性时间常数,  $T_{sh}$  为风力机对发电机的扭矩,  $T_e$  为发电机的电磁转矩,  $B$  为发电机转子的阻尼系数。由于转子侧变换器采用基于定子磁链定向的矢量控制,因此在基于定子磁链定向的 d-q 坐标系下电磁转矩的表达式为

$$[0030] \quad T_e = L_m (i_{ds} i_{qr} - i_{qs} i_{dr}) = \frac{L_m \psi_s}{L_s} i_{qr}$$

[0031] 综合转子运动方程和电磁转矩的表达式,可以看出减小发电机转子电流的 q 轴分量  $i_{qr}$  即可减小电磁转矩,从而使发电机加速运行。

[0032] 本发明提出的低电压穿越控制方法,其转子侧控制器的具体实施方案为:当检测到双馈风力发电机组的并网点电压、定子电流、转子电流和变换器直流侧电压中的任意一值达到限制值时,取消有功功率外环,将转矩电流的参考值  $i_{qrref}$  设定为 0,使发电机转子加速运行,从而将发电机中的不平衡电能转换为转子的动能。采用零极点配置的方法选择 PI 调节器的参数,使内环和外环的上升时间分别小于 10ms 和 50ms,内、外环的超调量均小于 20%。待故障切除后,转子侧控制器又切换到正常运行情况的结构,故障时转换的动能又能重新转换为电能柔性释放至电网。

[0033] 如果在故障过程中,转速超过额定转速,风力机控制器的桨距角控制环节将立即启动,将转速限制在额定值范围内。因此,本发明提出的方法不会对风力发电机组的机械系统造成冲击。

[0034] 直流侧电容电压的动态方程为

$$[0035] \quad C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = i_{os} - i_{or}$$

[0036] 式中,  $U_{dc}$  为直流侧电压,  $i_{os}$  和  $i_{or}$  分别为网侧和转子侧流向直流侧的电流。若忽略电感、电阻和变换器的损耗,有

$$[0037] \quad i_{os} = \frac{\sqrt{3}m}{\sqrt{2}} i_{dl}$$

$$[0038] \quad i_{or} = \frac{P_r}{U_{dc}}$$

[0039] 式中,  $P_r$  是发电机转子回路有功功率的幅值,  $i_{dl}$  是网侧电感电流的 d 轴分量,  $m$  是网侧变换器的调制比。

[0040] 在正常运行情况下,当流过转子侧和网侧变换器的能量平衡时,  $i_{os}$  和  $i_{or}$  相等。当电网发生故障时,流过转子侧和网侧变换器的能量不再平衡,则  $i_{os}$  不等于  $i_{or}$ ,因此直流侧电压会产生波动。为了减小直流侧电压的波动,本发明提出的低电压穿越控制方法,其网侧控制器的具体实施方案为:当检测到双馈风力发电机组的并网点电压、定子电流、转子电流和变换器直流侧电压中的任意一值达到限制值时,在直流侧电压外环 PI 控制器的输出信号中加入反映  $i_{or}$  的前馈补偿量  $P_r/U_{dc}$ ,从而平衡转子功率的瞬时波动,减小直流侧电压的波动。采用零极点配置的方法选择 PI 调节器的参数,使内环和外环的上升时间分别小于 10ms 和 50ms,内、外环的超调量均小于 20%。待故障切除后,网侧控制器又切换到正常运行情况的结构。

[0041] 以一台 1.5MW 的典型双馈风力发电机组在两种典型的电网三相短路故障情况下的运行情况为例,说明本发明控制方法的有效性。当公共连接点 (PCC) 电压跌落为 0 伏并且故障持续时间为 150ms 时,采用传统的转子短路保护技术和在变换器的直流侧并联卸荷电路所得到的双馈风力发电机组的运行效果如附图 3 所示,而采用本发明方法所得到的双馈风电机组运行效果如附图 4 所示。当故障发生后,采用传统的保护技术时,转子电流峰值为 2.2p. u.,定子电流、发电机组的有功、无功功率以及直流侧电压的波动都很大。而采用本发明方法时,转子电流峰值仅为 0.96p. u.,被控制在 2 倍额定峰值电流以内,定子电流、发

发电机组的有功、无功功率以及直流侧电压的波动都较小。当故障切除后,本发明方法也能够使系统迅速恢复正常。

[0042] 当公共连接点 (PCC) 电压跌落至额定值的 15% 并且故障持续时间为 625ms 时,采用传统的转子短路保护技术和在变换器的直流侧并联卸荷电路所得到的双馈风力发电机组的运行效果如附图 5 所示,而采用本发明方法所得到的双馈风电机组运行效果如附图 6 所示。当故障发生后,与采用传统的保护技术相比,采用本发明方法时,转子电流、定子电流、发电机组的有功、无功功率以及直流侧电压的波动都较小。当故障切除后,本发明方法也能够使系统具有较好的阻尼并迅速恢复正常。

[0043] 以上所述,仅是本发明的较佳实施例而已,并非对本发明作任何形式上的限制,虽然本发明已以较佳实施例揭露如上,然而并非用以限定本发明,任何熟悉本专业的技术人员,在不脱离本发明技术方案范围内,当可利用上述揭示的方法及技术内容作出些许的更动或修饰为等同变化的等效实施例,但凡是未脱离本发明技术方案的内容,依据本发明的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化与修饰,仍属于本发明技术方案

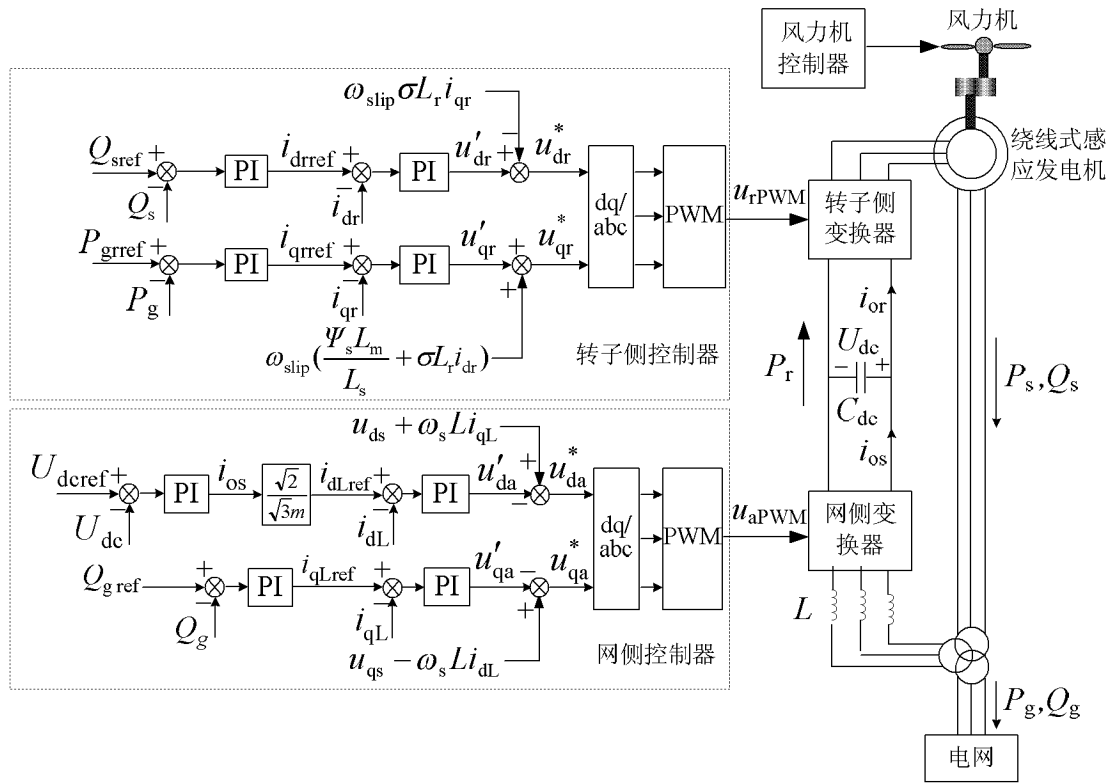


图 1

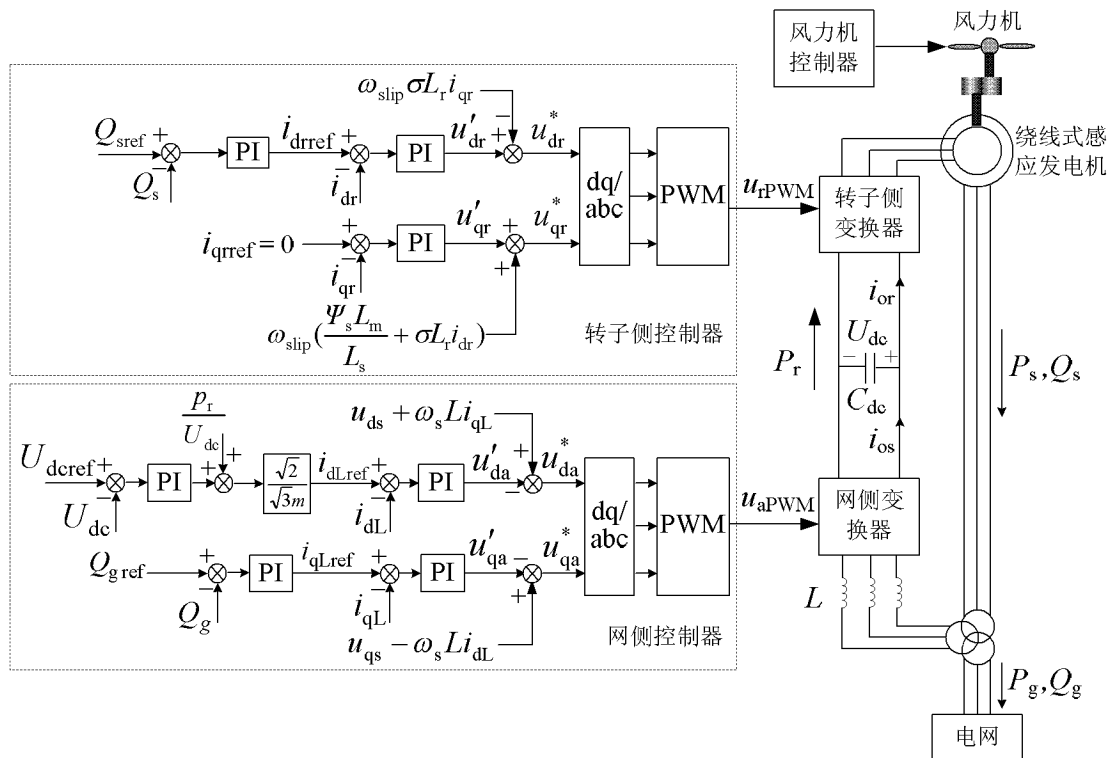


图 2



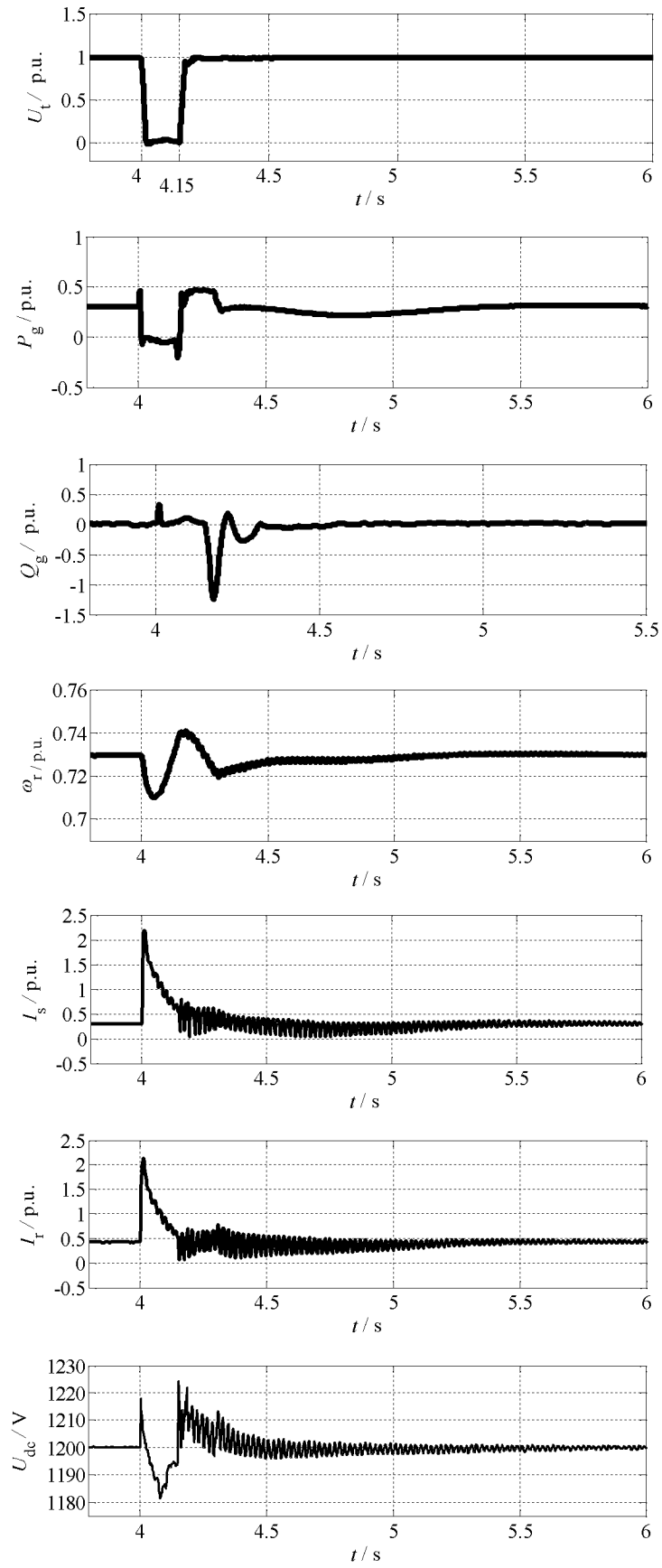


图 3

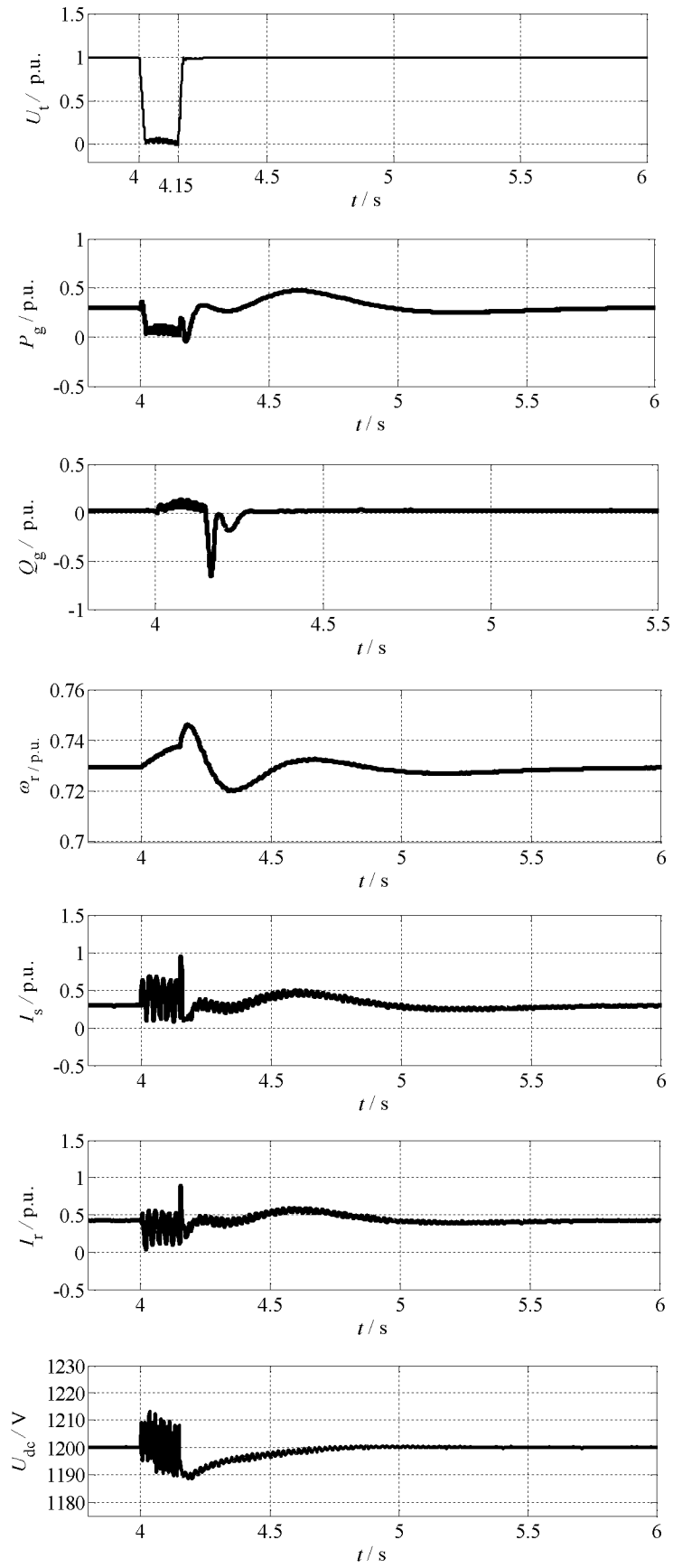


图 4

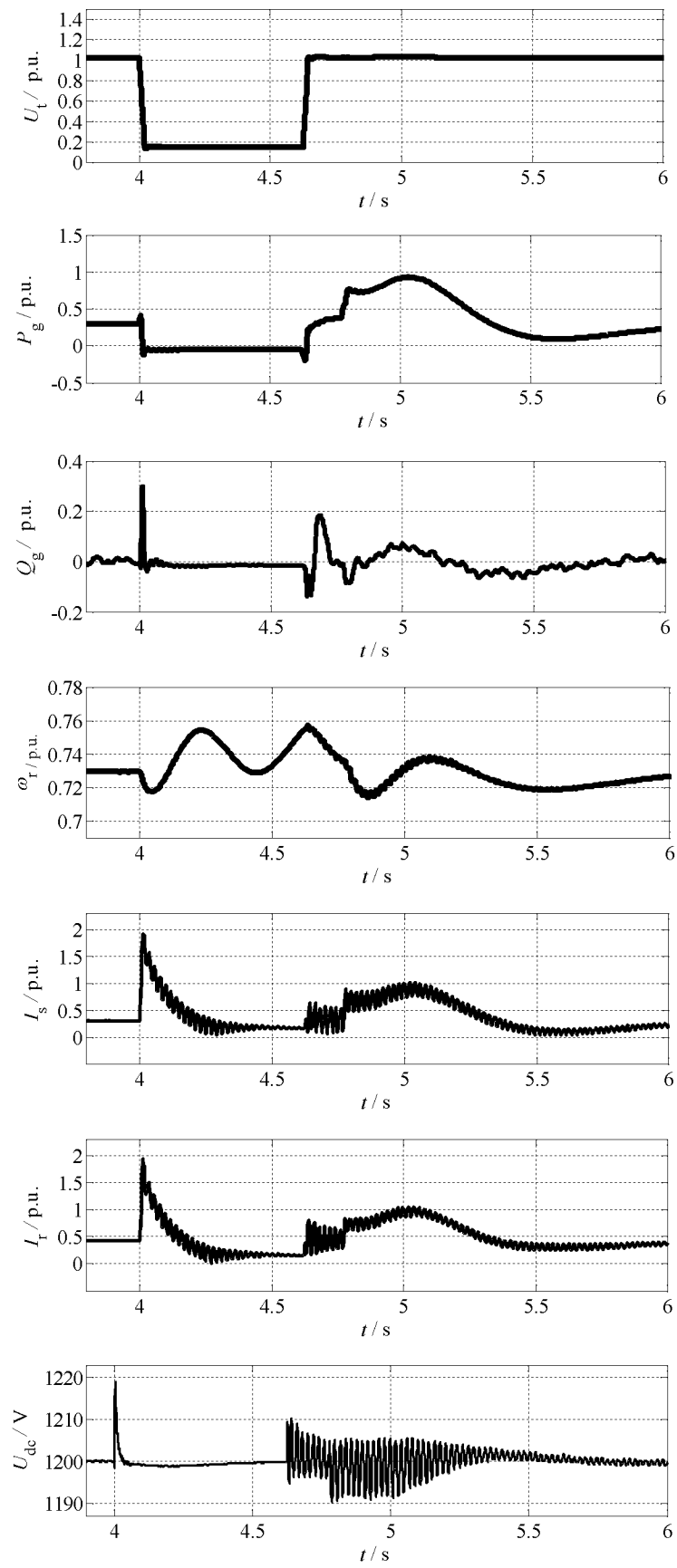


图 5

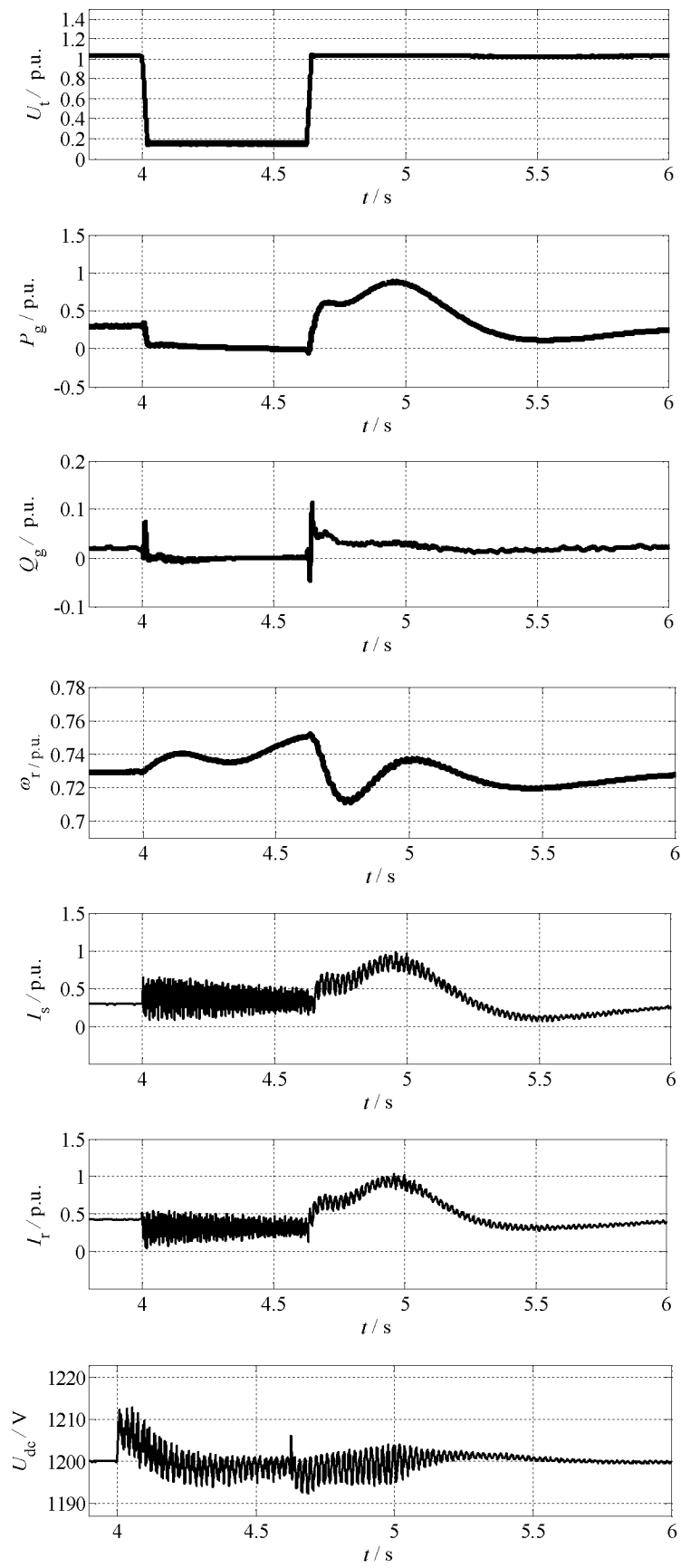


图 6