



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102097816 B

(45) 授权公告日 2013. 10. 02

(21) 申请号 200910258116. 4

(22) 申请日 2009. 12. 14

(73) 专利权人 徐隆亚

地址 美国俄亥俄州哥伦布市俄亥俄州立大学电气工程系

专利权人 张振栋
管博

(72) 发明人 徐隆亚 张振栋 管博

(74) 专利代理机构 北京北新智诚知识产权代理有限公司 11100

代理人 张卫华

(51) Int. Cl.

H02J 3/38 (2006. 01)

H02J 3/16 (2006. 01)

(56) 对比文件

CN 101383580 A, 2009. 03. 11,

CN 101383576 A, 2009. 03. 11,

WO 2008/145191 A1, 2008. 12. 04,

Johan Morren et al. Ridethrough of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip. 《IEEE Transactions on Energy Conversion》. 2005, 第20卷(第2期),

Dawei Xiang et al. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through. 《IEEE Transactions on Energy Conversion》. 2006, 第21卷(第3期),

审查员 沈杰

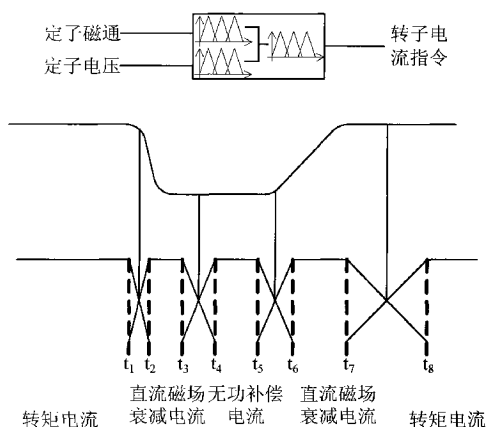
权利要求书2页 说明书5页 附图4页

(54) 发明名称

双馈风力发电系统低电压穿越控制方法

(57) 摘要

本发明是一种双馈风力发电系统低电压穿越控制方法,包括以下步骤:1) 检测电机的零频瞬态磁通分量;2) 当发现电机有零频瞬态磁通分量突发的情况时,则控制转子侧变流器和网侧变流器,衰减其零频瞬态磁通分量;3) 控制转矩电流和电网无功补偿电流,以抑制有害电压的生长并防止有害电流形成。它能够真正的实现消除定子电压的突降和突升造成的零频瞬变磁通,并抑制负序电流,从而在保护转子侧和网侧变流器的同时又避免风机发电系统脱网,同时也能防止电压恢复时零频瞬态磁通叠加造成转子侧感应双倍的超高危险电压,实现了电网友好型智能低电压穿越。



CN 102097816 B

1. 一种双馈风力发电系统低电压穿越控制方法,其特征在于包括以下步骤:

a) 检测电机的零频瞬态分量磁通;

b) 当发现电机有零频瞬态分量磁通突发的情况时,则控制转子侧变流器和网侧变流器,衰减其零频瞬态分量磁通;

c) 控制转矩电流和电网无功补偿电流,以抑制有害电压的生长并防止有害电流形成;所述控制转子侧变流器的步骤为:

1) 根据定子电压和电流反馈,通过磁通观测模块得到定子磁通的正序分量、负序分量以及零频瞬态分量;

2) 将上述磁通分量、定子电压幅值及其变化速率,输入到模糊控制模块进行模糊控制,得到转子转差频率的无功电流给定值和有功电流给定值,以及转子转速频率的无功电流给定值和有功电流给定值;

3) 将上述电流给定值和转子三相电流反馈值相比较,将所得的电流差值送入 PI_R 电流控制器调节,得到无功电压输出值和有功电压输出值,此 PI-R 电流控制器由 PI 控制器叠加谐振环节 R 组成;

4) 对无功电压输出值和有功电压输出值进行前馈电压补偿,得到无功电压给定值和有功电压给定值;

5) 输入电机定子磁通相位角度和电机旋转电角度,对无功电压给定值和有功电压给定值进行坐标变换,得到转子电压三相给定值;

6) 把电压三相给定值输入到空间电压矢量 PWM 指令器,由该 PWM 指令器产生相应的开关信号以控制转子侧变流器;

所述控制网侧变流器的步骤为:

1) 将直流母线电压的给定值与直流母线电压的反馈值相比较,所得的直流母线电压差值经直流母线电压控制器得到网侧有功电流给定值;

2) 根据网侧功率因数给定值得到网侧无功电流给定值;

3) 将网侧有功电流给定值和网侧无功电流给定值,及转子侧磁通观测模块输出的定子磁通的正序分量、负序分量以及零频瞬态分量,以及网侧定子电压值及其微分,输入到模糊控制模块进行模糊控制,得到网侧的同步频率有功电流给定值和同步频率无功电流给定值,以及网侧的零频有功电流给定值和零频无功电流给定值;

4) 将上述电流给定值跟实测的网侧有功电流和无功电流相比较,将所得的电流差值送入 PI_R 电流控制器调节,得到无功电压输出值和有功电压输出值,此 PI-R 电流控制器由 PI 控制器叠加谐振环节 R 组成;

5) 对无功电压输出值和有功电压输出值进行前馈电压补偿,得到无功电压给定值和有功电压给定值;

6) 输入电网同步电角度,对无功电压给定值和有功电压给定值进行坐标变换,得到转子电压三相给定值;

7) 把电压三相给定值输入到空间电压矢量 PWM 指令器,由该 PWM 指令器产生相应的开关信号以控制网侧变流器。

2. 如权利要求 1 所述的双馈风力发电系统低电压穿越控制方法,其特征在于:

在所述步骤 b) 中,使用磁通观测模块观测定子零频瞬态分量磁通并提供控制信号,磁

通观测模块从定子磁通中分离出常态正序、负序以及零频瞬态分量,然后用转子侧变流器控制转速频率的电流,再用网侧变流器控制零频电流,使得零频瞬态分量磁通在定子绕组以最快的速度衰减。

3. 如权利要求 2 所述的双馈风力发电系统低电压穿越控制方法,其特征在于:

在电压跌落瞬间,转子绕组中感应出多种反电势,分别对应磁通的常态正序、负序以及零频瞬态分量,磁通观测模块控制转子侧变流器输出与转子侧感应的负序电压同频率、同幅值和同相位的电压,使得转子回路中不能产生负序电流;同时控制转子侧与零频瞬态分量磁通对应的转速频率电流,使得它与转子零频瞬态分量磁通同向。

4. 如权利要求 1 所述的双馈风力发电系统低电压穿越控制方法,其特征在于:

在所述步骤 c) 中,使用模糊控制模块在电压跌落及回升的暂态过程中,在各个电流控制模式之间实现平滑的切换,该模块根据定子电压及其变化斜率来判断系统所处状态,并结合定子磁通中的各序分量来决定转子电流给定值。

双馈风力发电系统低电压穿越控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及双馈风力发电系统低电压穿越控制方法,属于风力发电新能源领域。

背景技术

[0002] 风力发电技术由于其无污染和可再生性,在全球范围电网中展现出强劲的势头。在众多风力发电方案中,变速恒频双馈交流发电系统和永磁直驱发电系统由于各自的优异特性,是目前主流的风力发电电气解决方案。永磁直驱系统由于需要使用大量的永磁体以及全功率变换器,高昂的造价使它难以普及。双馈发电系统造价低廉,但由于发电机定子与电网直接电气相连,当电网电压突然跌落时,由于变流器有限的直流母线电压无法与转子侧感应的巨大瞬态电压匹配,造成整个系统由于过流而跳闸保护,导致风力发电机组突然与电网脱离。这种突然的脱网,不但需要电压恢复后的重新并网等一系列过程,而且这个瞬态过程对外电网也是一种冲击,有可能引起其他风力发电机组纷纷跳闸,恶性循环冲击,造成整个电网震荡,最终导致整个风电场解裂。这就是双馈风力发电系统的电网非友好型问题。因此针对解决双馈风力发电系统的电压突然跌落后系统的保护以及减少对电网的冲击成为迫在眉睫的问题。

[0003] 由于当前电网对发电系统的鲁棒性和电能的质量要求日益严格,因此在双馈风力发电系统中采用低电压穿越技术是解决上述问题的关键技术。低电压穿越技术指在电网电压降落和恢复的过程中,系统通过附加硬件设备或软件的方法,防止风机的脱网以及变流器和控制器的毁坏。硬件的方法主要指在转子与变流器之间添加并联保护电路(Crow Bar)。这种技术虽然部分有效,但存在较多的缺点:首先,额外的硬件保护装置增加制造成本;其次,保护电路的投切本身对系统造成有害冲击;另外,转子的短路运行使电机从电网吸收大量无功,导致电压降落更加剧烈。纯软件的方法指在不改变硬件系统结构的基础上,通过人工智能修改控制策略,达到低电压穿越的效果。虽然目前提出的软件控制方法较多,但都无法达到实际应用的效果。

发明内容

[0004] 为此,本发明的目的是克服现有技术的不足,提供一种双馈风力发电系统低电压穿越控制方法,它能够真正的实现消除定子电压的突降和突升造成的暂态瞬变磁通,并抑制负序电流,从而在保护转子侧变流器的同时又避免风机发电系统脱网,同时也能防止电压恢复时暂态磁通叠加造成转子侧感应双倍的超高危险电压,实现了电网友好型智能低电压穿越。

[0005] 为实现上述目的,本发明采用以下技术方案:

[0006] 一种双馈风力发电系统低电压穿越控制方法,包括以下步骤:

[0007] 1) 检测电机的零频瞬态磁通分量;

[0008] 2) 当发现电机有零频瞬态磁通分量突发的情况时,则控制转子侧变流器和网侧变流器,衰减其零频瞬态磁通分量;

[0009] 3) 控制转矩电流和电网无功补偿电流,以抑制有害电压的生长并防止有害电流形成。

[0010] 本发明在定子侧电网电压跌落和恢复的暂态过程中,通过合理控制电网及转子侧的背靠背电流变换器,实现以下两个重要功能:1. 转子回路没有危险性的高电压,没有危险性的大电流,2. 定子回路不脱离电网,不对电网形成第二次冲击,从而达到平稳穿越低电压的目的。

[0011] 本发明的优点是:完全依靠以人工智能为基础的软件算法实现,不要求传统标准的双馈发电系统增加其他硬件或装置,能显著提升系统性能降低系统成本。本发明方法控制的是与定子零频瞬态磁通分量相对应的转子电流,不会产生任何附加的机械瞬态转矩,不会对机械系统有任何冲击。

附图说明

[0012] 图 1 是双馈系统硬件结构图;

[0013] 图 2 是传统双馈系统变流器转子侧和网侧控制框图;

[0014] 图 3 是双馈系统转子侧变流器控制框图;

[0015] 图 4 是双馈系统网侧变流器控制框图;

[0016] 图 5 是磁通观测模块及其矢量图;

[0017] 图 6 是磁通观测模块实现框图;

[0018] 图 7 是模糊控制模块及电流切换流程;

[0019] 图 8 是谐振 PI (PI-R) 调节器结构图。

具体实施方式

[0020] 本发明是一种双馈风力发电系统低电压穿越控制方法,包括以下步骤:

[0021] 1) 检测电机的零频瞬态磁通分量;

[0022] 2) 当发现电机有零频瞬态磁通分量突发的情况时,则控制转子侧变流器和网侧变流器,衰减其零频瞬态磁通分量;

[0023] 3) 控制转矩电流和电网无功补偿电流,以抑制有害电压的生长并防止有害电流形成。

[0024] 其中:

[0025] 控制转子侧变流器的详细步骤为:

[0026] 1) 根据定子电压和电流反馈,通过磁通观测器得到定子磁通的正序分量、负序分量以及零频暂态分量;

[0027] 2) 将上述磁通分量、定子电压幅值及其变化速率,输入到模糊控制器进行模糊控制,得到转子转差频率的无功电流给定值和有功电流给定值,以及转子转速频率的无功电流给定值和有功电流给定值;

[0028] 3) 将上述电流给定值和转子三相电流反馈值相比较,将所得的电流差值送入 PI-R 电流控制器调节,得到无功电压输出值和有功电压输出值,此 PI-R 控制器由 PI 控制器叠加谐振环节 R 组成;

[0029] 4) 对无功电压输出值和有功电压输出值进行前馈电压补偿,得到无功电压给定值

和有功电压给定值；

[0030] 5) 输入电机定子磁通相位角度和电机旋转电角度,对无功电压给定值和有功电压给定值进行坐标变换,得到转子电压三相给定值；

[0031] 6) 把三相电压给定值输入到空间电压矢量 PWM 指令器,由该 PWM 指令器产生相应的开关信号以控制转子侧变流器。

[0032] 控制网侧变流器的详细步骤为：

[0033] 1) 将直流母线电压的给定值与直流母线电压的反馈值相比较,所得的直流母线电压差值经直流母线电压控制器得到网侧有功电流给定值；

[0034] 2) 根据网侧功率因数给定值得到网侧无功电流给定值；

[0035] 3) 将网侧有功电流给定值和网侧无功电流给定值,及转子侧磁通观测模块输出的定子磁通的正序分量、负序分量以及零频暂态分量,以及网侧定子电压值及其微分,输入到模糊控制模块进行模糊控制,得到网侧的同步频率有功电流给定值和同步频率无功电流给定值,以及网侧的零频有功电流给定值和零频无功电流给定值；

[0036] 4) 将上述电流给定值跟实测的网侧有功电流和无功电流相比较,将所得的电流差值送入 PI-R 电流控制器调节,得到无功电压输出值和有功电压输出值,此 PI-R 控制器由 PI 控制器叠加谐振环节 R 组成；

[0037] 5) 对无功电压输出值和有功电压输出值进行前馈电压补偿,得到无功电压给定值和有功电压给定值；

[0038] 6) 输入电网同步电角度,对无功电压给定值和有功电压给定值进行坐标变换,得到转子电压三相给定值；

[0039] 7) 把三相电压给定值输入到空间电压矢量 PWM 指令器,由该 PWM 指令器产生相应的开关信号以控制网侧变流器。

[0040] 下面结合附图详细介绍。

[0041] 双馈风力发电系统硬件结构如图 1 所示,当定子电压突然大幅跌落 ($\sim 80\%$) 时,电机气隙磁场中会有零频瞬态分量产生。该零频瞬态分量一方面会在电机转子绕组上感应出危险的高电压；另一方面在电网电压恢复时,也可能会感应出与电压降落时同相位的磁链分量,从而导致双倍的超高电压冲击。本发明所提方法是在发现电机有零频瞬态磁通分量突发的情况下,通过控制网侧和转子侧变流器,尽快衰减其零频瞬态磁通分量,并且协调控制转矩电流和电网无功补偿电流以抑制有害电压的生长并防止有害电流形成。

[0042] 传统双馈电机控制流程图如图 2 所示,上下两路控制流程分别对应转子侧和网侧变流器。在第一路控制流程图中, P^* 为转子侧有功功率指令; Q^* 为转子侧无功功率指令; V_{dc}^* 为网侧母线电压指令; $P.F.$ 为网侧功率因数指令。 i_{qg}^* 、 i_{dg}^* 分别为网侧有功电流和无功电流指令; i_{qg} 、 i_{dg} 分别为网侧实测有功电流和无功电流。在第二路控制流程图中 i_{qr}^* 、 i_{dr}^* 为转子侧有功电流和激磁电流指令; i_{qr} 、 i_{dr} 为转子侧实测有功电流和实测激磁电流; θ_{slip} 为转子侧电压矢量相位角度; θ_s 为电机定子磁通相位角度。 V_{ar}^* 、 V_{br}^* 、 V_{cr}^* 和 V_{ag}^* 、 V_{bg}^* 、 V_{cg}^* 分别为转子侧和网侧电压给定指令。

[0043] 本发明转子侧变流器的控制框图如图 3 所示,区别于传统双馈电机转子侧变流器的矢量控制,该系统框图中新增加了点划线框内的三个创新模块。它们分别为:磁通观测模块、模糊控制模块、带谐振的 PI 调节器模块,后文将分别详细分析他们的原理和作用。图

中： V_s 、 I_s 为电机定子电压和电流反馈信号； λ_{s_dc} 、 $\lambda_{s_ac_P}$ 、 $\lambda_{s_ac_N}$ 分别为定子直流磁通、定子正序交流磁通和定子负序交流磁通； i_{dr}^* 、 i_{qr}^* 、 $i_{dr_dc}^*$ 、 $i_{qr_dc}^*$ 分别为转子转差频率无功和有功电流给定值以及转速频率无功和有功电流给定值； V_{dr}' 、 V_{qr} 分别为转子电流调节器输出电压； i_{ar} 、 i_{br} 为转子三相电流反馈值； i_{as} 、 i_{bs} 为定子三项电流反馈值； V_{as} 、 V_{bs} 为定子三相端电压检测值； θ_{slip} 为转子滑差角度计算值； V_{ar}^* 、 V_{br}^* 、 V_{cr}^* 为转子三相电压给定值。

[0044] 转子侧变流器的控制算法主要分为六个步骤。第一步根据定子电压和电流反馈，通过磁通观测模块得到定子磁通的正序分量、负序分量以及零频暂态分量 λ_{s_dc} 、 $\lambda_{s_ac_P}$ 、 $\lambda_{s_ac_N}$ （后文将介绍磁通观测器的实现原理）；第二步根据这磁通分量，并结合定子电压幅值及其变化速率，作为模糊控制器的输入，得到转子的转差频率电流指令（注：本文中提及的指令即给定值，下同） i_{dr}^* 、 i_{qr}^* 和转速频率电流指令 $i_{dr_dc}^*$ 、 $i_{qr_dc}^*$ ；第三步由这些电流给定值和转子电流反馈值 i_{dr} 、 i_{qr} 相比较，得到电流差值经过 PI-R 电流控制器得到无功电压输出值 V_{dr}' 和有功电压输出值 V_{qr}' ；第四步是输出电压值并结合前馈电压补偿，得到无功电压指令 V_{dr}^* 和有功电压指令 V_{qr}^* ；第五步是输入电机定子磁通相位角度和电机旋转电角度，对指令电压 V_{qr}^* 和 V_{dr}^* 坐标变换，得到转子电压三相给定值 V_{ar}^* 、 V_{br}^* 和 V_{cr}^* ；第六步是把三相电压指令输入到空间电压矢量 PWM 指令器产生相应的开关信号以便控制转子侧变流器。

[0045] 本发明有关网侧变流器的控制框图如图 4 所示，区别于传统双馈电机网侧变流器的矢量控制，该系统框图增加了虚线框内的模块。具体原理和作用见后文。网侧变流器采用双闭环控制，第一环为直流母线电压控制环，第二环为电流控制环。第一环和第二环共包括七个主要的控制步骤。第一步将直流母线电压指令 V_{dc}^* 与反馈值 V_{dc} 相比较，以直流母线电压差值通过直流母线电压控制器得到网侧有功电流指令 i_{qg}^* ，直流母线电压控制器本质上就是 PI 调节器，它使实际直流母线电压能够跟上给定电压；第二步根据网侧功率因数指令 P.F. 并通过无功功率指令器可以得到网侧无功电流指令 i_{dg}^* ，无功功率指令器根据无功功率指令，通过无功功率和无功电流的关系，计算得到无功功率电流 i_{dg}^* ；第三步由转子侧磁通观测模块输出 λ_{s_dc} 、 $\lambda_{s_ac_P}$ 、 $\lambda_{s_ac_N}$ ，并结合网侧定子电压幅值及其微分，以及第二步的电流指令值，作为模糊控制模块的输入，得到网侧同步频率电流指令 i_{dg}^* 、 i_{qg}^* 和零频电流指令 $i_{dg_dc}^*$ 、 $i_{qg_dc}^*$ ；第四步再由这四个指令跟实测的网侧有功电流 i_{qg} 和无功电流 i_{dg} 相比较，得到的电流差值经过 PI_R 电流控制器得到无功电压输出值 V_{dg}' 和有功电压输出值 V_{qg}' ；第五步是上一步输出电压值加上前馈电压补偿，得到无功电压指令 V_{dg}^* 和有功电压指令 V_{qg}^* ；第六步是输入电网同步电角度，对指令电压 V_{qg}^* 和 V_{dg}^* 坐标变换，得到转子电压三相给定值 V_{ag}^* 、 V_{bg}^* 和 V_{cg}^* ；第七步是把三相电压指令输入到空间电压矢量 PWM 指令器产生相应的开关信号以便控制网侧变流器。

[0046] 下面再分别解释三个创新模块的作用：

[0047] 磁通观测模块用来观测定子零频瞬态磁通分量并提供反馈控制信号。此磁通观测模块从定子磁通中分离出常态正序、负序以及零频瞬态分量；然后用转子变流器控制转速频率的电流，和用网侧变流器控制零频电流，使得零频瞬态磁通分量在定子绕组以最快的速度衰减。控制方法矢量图如图 5 所示，在电压跌落瞬间，转子绕组感应出三种反电势 V_r^+ 、 V_r^- 、 V_r^0 他们分别对应磁通 λ_r^+ 、 λ_r^- 、 λ_r^0 。转子侧变流器输出与转子侧感应的负序电压同频率，同幅值和同相位的电压，使得转子回路中不能产生负序电流；同时控制转子侧零频瞬态磁通分量对应的电流（转速频率电流），使得它与转子零频瞬态磁通分量同相。磁通观测

模块的具体实现如图 6 所示,由定子电压和定子电流,计算出定子磁通。此时定子磁通包含正序,负序和零频三种分量。正序和负序频率固定,通过滤波器得到。零频瞬态分量为总磁通与正序和负序分量之差。

[0048] 模糊控制模块的作用是在电压跌落及回升的暂态过程中,在各个电流控制模式之间实现平滑的切换。为避免传统的逻辑判断存在的阶越变化,造成新的系统暂态冲击,本发明以模糊控制语言学来映射输入输出;经过这样处理,系统不会产生阶越冲击,而是实现各个控制模式平滑过渡。该模块根据定子电压及其变化斜率来判断系统所处状态,并结合定子磁通中的各序分量来决定转子电流给定值。模糊控制模块输入输出及工作流程如图 7 所示:在时间 t_1 系统检测到电网电压跌落,此时模糊控制下的模式转换开始,转子侧负载转矩电流开始减小,注入的直流磁场衰减电流增大;到时间 t_2 电压跌落到最低值,此时负载指令电流为零,转子侧所有的电流用来衰减直流磁场;到时间 t_3 在直流磁场衰减到一定程度后,慢慢减少此电流,开始注入无功补偿电流;到时间 t_4 转子侧所有的电流用来补偿无功,至此电压跌落暂态过程结束;从 t_5 开始电压回升,此后所有的过程是电压跌落的逆过程,直到电压恢复到额定值,转子重新注入转矩电流,系统以最大能力往电网输送电能。

[0049] 谐振 PI 调节模块(即 PI-R 控制器)是根据模糊控制模块的电流输出给定和电机电流传感器实测电流反馈构成电流闭环控制。由于在转子侧需要同时控制多种频率分量的电流,这里通过在普通的 PI 调节器上并联谐振环节来实现。如图 8 所示,PI-R 控制器(点划线外框)在普通 PI 控制器(虚线内框)基础上叠加了谐振环节 R(本质是带通滤波器),这个谐振环节可以提高给定谐振频率点的幅频响应,从而使调节器可以同时调节直流和特定的交流分量。谐振调节器是对双 PI 调节器的简化,它不用对信号进行频率的检测和不同频率变量的分离,就可以同时对含有多种频率分量的信号进行调节。

[0050] 本发明控制的是与定子零频瞬态磁通分量相对应的转子电流,不会产生任何附加的机械瞬态转矩,不会对机械系统有任何冲击。

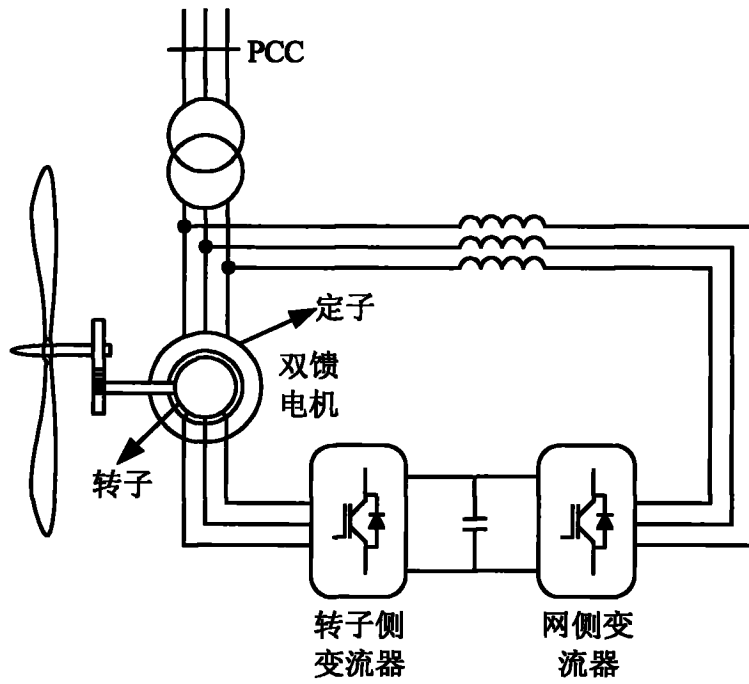


图 1

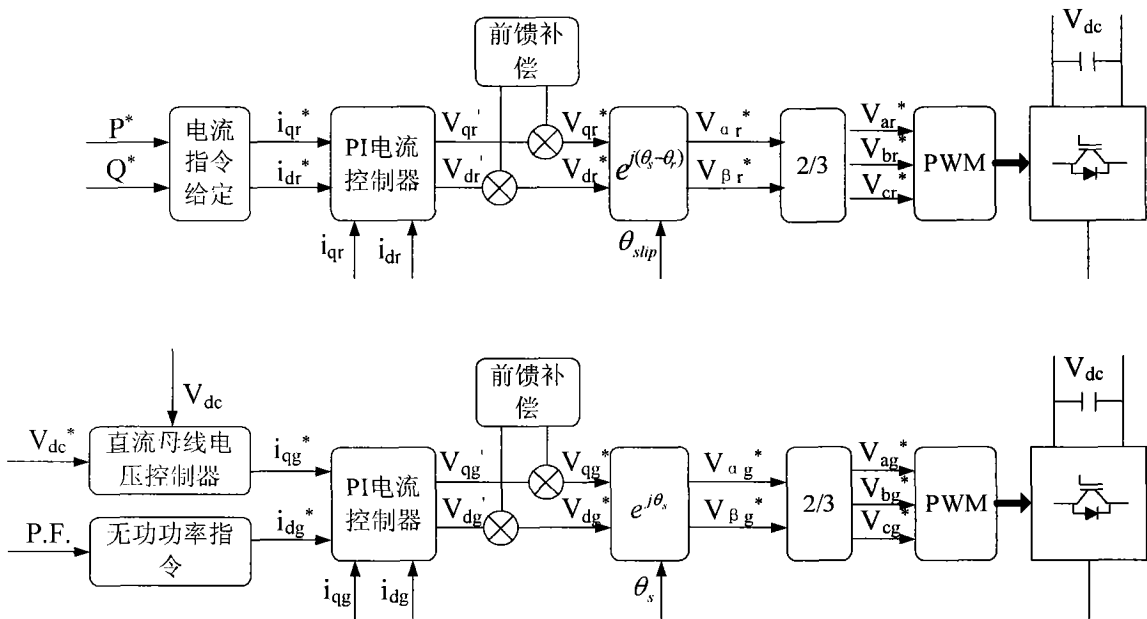


图 2

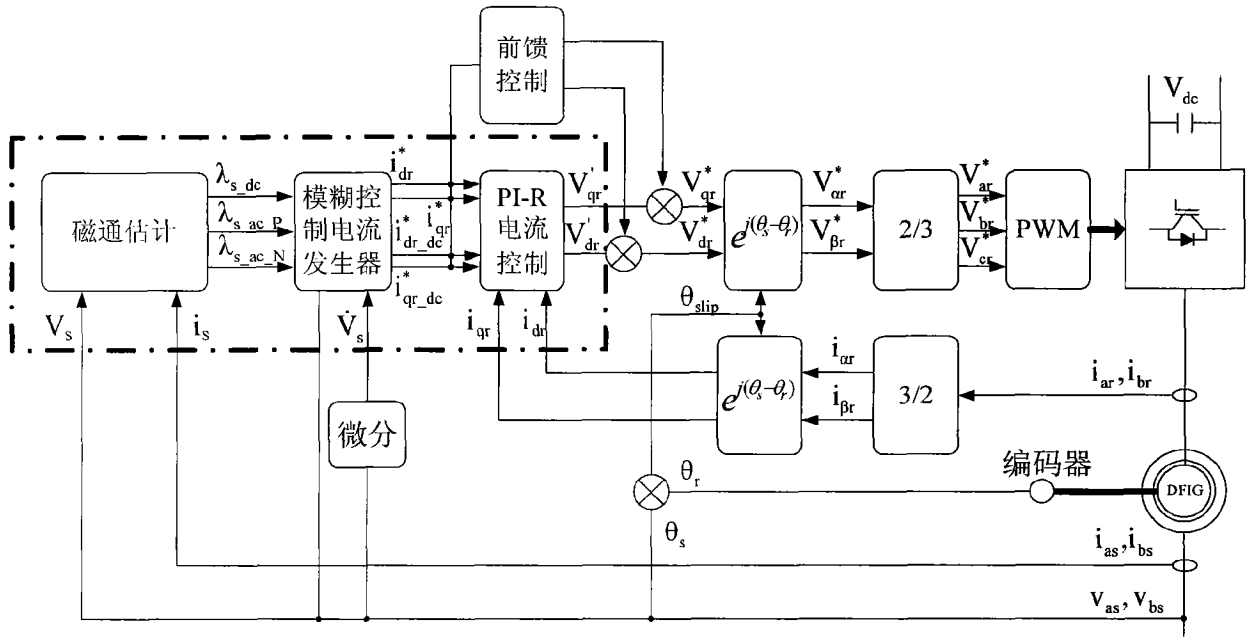


图 3

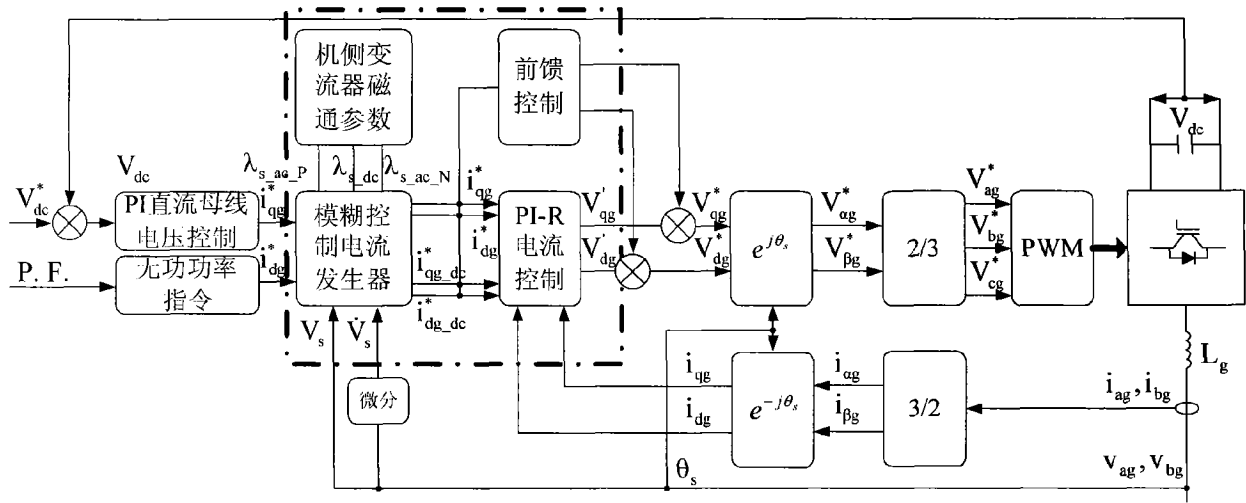
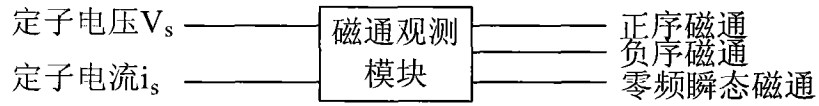


图 4



转子侧变流器负序电压和直流电流

转子侧绕组在定子电压跌落后对应空间磁通和感应的各电压分量

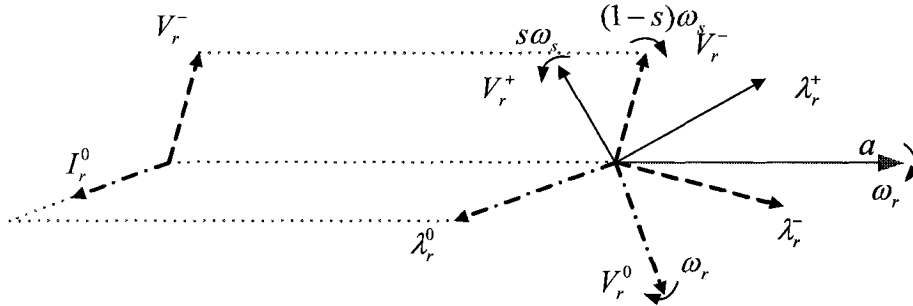


图 5

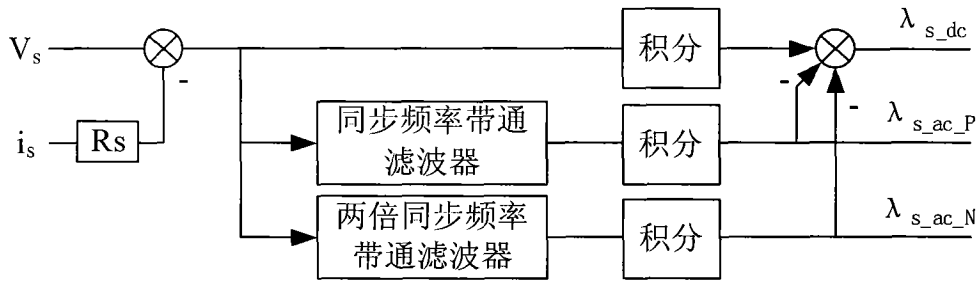


图 6

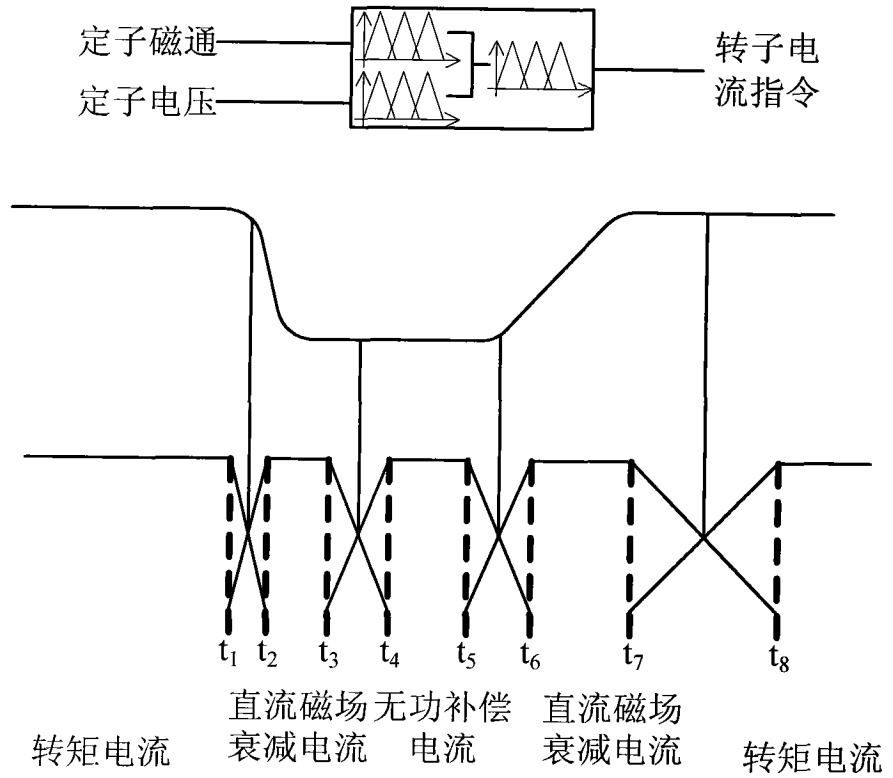


图 7

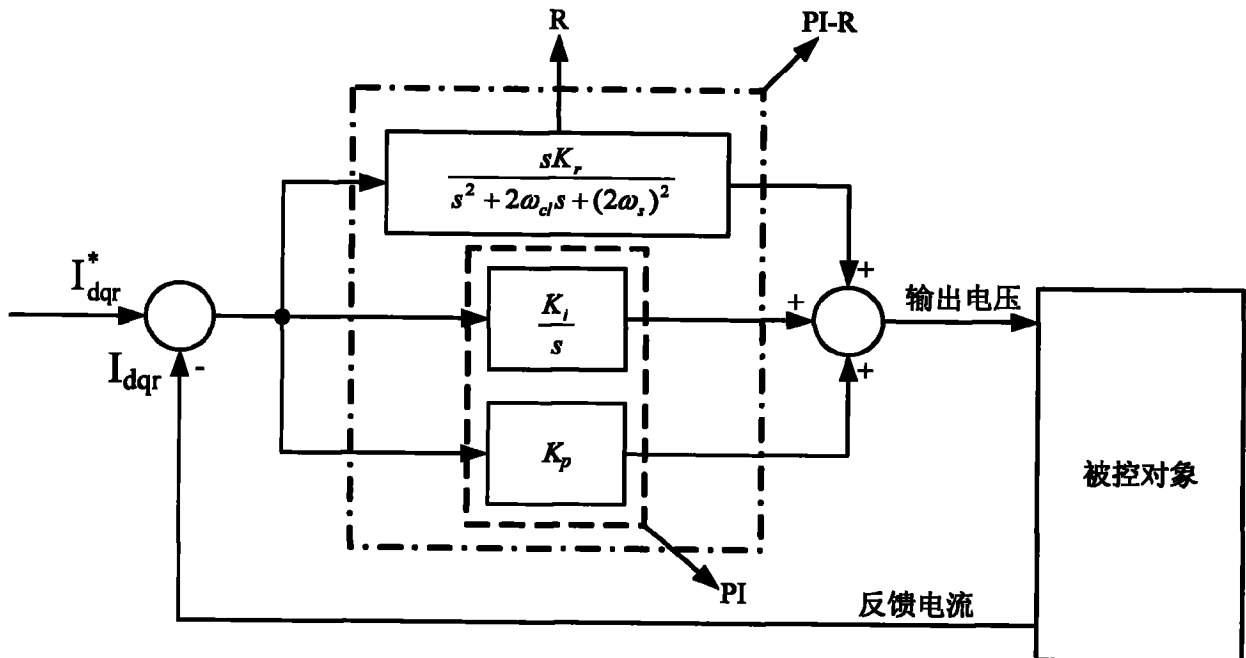


图 8