

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103326368 A

(43) 申请公布日 2013. 09. 25

(21) 申请号 201310233477. X

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2013. 06. 13

H02J 3/16 (2006. 01)

(71) 申请人 国家电网公司

地址 100031 北京市西城区西长安街 86 号

申请人 中国电力科学研究院

中电普瑞张北风电研究检测有限公司

江苏省电力公司

浙江省电力公司

(72) 发明人 孙蔚 迟永宁 李琰 苏媛媛

刘超 王真 汤海雁 张占奎

魏林君 王志冰 白宏 张小瑜

(74) 专利代理机构 北京安博达知识产权代理有限公司 11271

代理人 徐国文

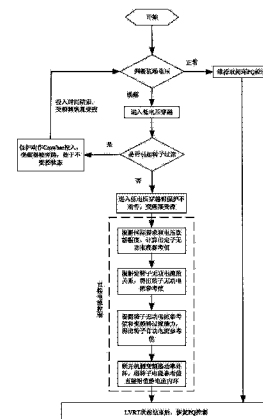
权利要求书2页 说明书7页 附图4页

(54) 发明名称

电网故障期间双馈风电机组动态无功电流直接控制方法

(57) 摘要

本发明提供了一种电网故障期间双馈风电机组动态无功电流直接控制方法,该方法包括如下步骤:a.判断双馈风力发电机是否进入低电压穿越(LVRT)模式;b.正常运行时,风电机组采用功率外环、电流内环的双闭环控制方式;c.如果故障期间没有引起保护动作,则风机进入LVRT模式下直接电流控制;d.如果电网故障引起转子变流器过流或直流电容过压,则变流器进入闭锁状态、撬棒保护动作将变流器旁路,直至设定的投入时间结束,变频器恢复受控。本发明提出的电网故障期间双馈风电机组动态无功电流直接控制技术可以实现故障期间风电机组向电网快速注入无功电流,提供电压支撑,有助于风电机组实现低电压穿越。



1. 一种直接控制电网故障双馈风电机组动态无功电流的方法,所述方法依次完成下述步骤:判断所述风电机组的机端电压;进入低电压穿越模式;判断转子过流;其特征在于:进入直接电流控制模式;低电压穿越状态结束,恢复双闭环控制。

2. 如权利要求 1 所述的一种直接控制电网故障双馈风电机组动态无功电流的方法,其特征在于:所述判断机端电压为通过判断并网点电压标幺值是否小于或等于 0.9 确定所述双馈风电机组是否进入低电压穿越模式。

3. 如权利要求 1 所述的一种直接控制电网故障双馈风电机组动态无功电流的方法,其特征在于:所述转子过流为变流器过流和 / 或直流电容过压。

4. 如权利要求 1 所述的一种直接控制电网故障双馈风电机组动态无功电流的方法,其特征在于:所述直接电流控制模式包括通过判断转子过流以依次获得:

I、定子无功电流参考值,

II、转子无功电流参考值,和

III、转子有功电流参考值;

IV、进而断开机侧变频器功率外环,给电流内环赋值。

5. 如权利要求 4 所述的一种直接控制电网故障双馈风电机组动态无功电流的方法,其特征在于:所述 I 的获得方法包括以下步骤:

1)、确定动态无功电流,即确定故障过程中定子无功电流绝对值,如式(1):

$$\left| i_{q_stator}^{ref} \right| \geq 1.5 \times (0.9 - U_T) I_N \quad (1)$$

2)、确定定子无功电流和转子无功电流绝对值的关系如式(2):

$$\left| i_{q_stator} \right| = \frac{U_s}{\omega_s L_s} + \frac{L_m}{L_s} \left| i_{q_rotor} \right| \quad (2)$$

式中, L_s 为定子自感, L_m 为转子自感, I_N 为风电场额定电流, ω_s 为定子磁链, $i_{q_stator}^{ref}$ 为定子无功电流参考值, i_{q_stator} 为定子无功电流, i_{q_rotor} 为转子无功电流, U_T 为并网点电压, U_s 为定子电压。

6. 如权利要求 5 所述的一种直接控制电网故障双馈风电机组动态无功电流的方法,其特征在于:所述 II 的获得方法为:

将所述式(1)带入所述式(2),获得如式(3)的国标中对所述转子无功电流参考值的要求:

$$\left| i_{q_rotor}^{ref} \right| \geq \frac{L_s}{L_m} 1.5 \times (0.9 - U_T) I_N - \frac{U_s}{\omega_s L_m} \quad (3)$$

风电场并网点电压 U_T 等效为定子电压 U_s ,将式(3)写成:

$$\begin{aligned} \left| i_{q_rotor}^{ref} \right| &\geq \frac{L_s}{L_m} 1.5 \times (0.9 - U_T) I_N - \frac{U_T}{\omega_s L_m} \\ &\geq \frac{L_s}{L_m} 1.5 \times (0.9 - U_T) I_N - \frac{U_T - 0.9}{\omega_s L_m} - \frac{0.9}{\omega_s L_m} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\geq \left(\frac{L_s}{L_m} 1.5 \times I_N + \frac{1}{\omega_s L_m} \right) (0.9 - U_T) - \frac{0.9}{\omega_s L_m}$$

$$\geq k'(0.9 - U_T) - c$$

式中, $k' = \left(\frac{L_s}{L_m} 1.5 \times I_N + \frac{1}{\omega_s L_m} \right)$, $c = \frac{0.9}{\omega_s L_m}$; L_s 为定子自感, L_m 为转子自感, I_N 为风电场

额定电流, ω_s 为定子磁链, $i_{q_stator}^{ref}$ 为定子无功电流参考值, $i_{q_rotor}^{ref}$ 为转子无功电流参考值, U_T 为并网点电压。

7. 如权利要求 6 所述的一种直接控制电网故障双馈风电机组动态无功电流的方法, 其特征在于: 所述 III 的获得为转子电流 d 轴分量的参考值的获得;

所述转子电流 d 轴分量的参考值通过故障前变频器的过流能力及无功电流的参考值获得; 所述转子有功电流参考值 $i_{d_rotor}^{ref}$ 的计算满足国标要求的无功注入;

获得转子无功 / 有功电流参考值分别为:

$$\begin{cases} |i_{q_rotor}^{ref}| = k(0.9 - U_T) - c \\ |i_{d_rotor}^{ref}| = \sqrt{(I_{rotor}^{over})^2 - (i_{q_rotor}^{ref})^2} \end{cases}$$

式中, k 为可变参数, 调节风电机组发出的无功电流, 补偿将 U_T 等效为风电机组机端电压的误差, k 调节范围为 $k \geq (L_s/L_m) 1.5 \times I_N + 1/(\omega_s L_m)$;

L_s 为定子自感, L_m 为转子自感, I_N 为风电场额定电流, ω_s 为定子磁链, $i_{q_rotor}^{ref}$ 为转子无功电流参考值, $i_{d_rotor}^{ref}$ 为转子有功电流参考值, U_T 为并网点电压, I_{rotor}^{over} 为风电机组能承受的最大过电流。

8. 如权利要求 1 所述的一种直接控制电网故障双馈风电机组动态无功电流的方法, 其特征在于: 所述双闭环控制是指功率外环控制和电流内环控制;

所述功率外环控制为定子有功功率参考值与反馈值的偏差经过 PI 调节器得到的转子电流 d 轴分量的参考值, 定子无功功率参考值和反馈值的偏差经过 PI 调节器得到转子电流 q 轴分量的参考值;

所述电流内环控制为电流误差经调节后输出电压参考值, 叠加补偿量, 得到的同步旋转坐标系中的转子电压参考值。

电网故障期间双馈风电机组动态无功电流直接控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种新能源发电技术中的风电机组并网技术领域的控制方法,具体讲涉及一种电网故障期间双馈风电机组动态无功电流直接控制的方法。

背景技术

[0002] 近几年,随着我国风电装机规模的不断增长,风电在电网中的比重不断提高,风电并网对电力系统安全稳定运行带来的问题也越来越严重。我国电网中陆续发生了多起因风电机组不具备低电压穿越能力造成的大规模风电机组脱网事故。2011年1月份到4月份,甘肃酒泉地区各风电场共发生电气设备故障超过30起,事故导致各风电场并网点电压大幅度跌落,各风电场并网点电压低于90%额定电压的持续时间一般在100~150ms之间,部分运行风电机组因低电压保护动作脱网。故障分析中发现:部分不具备动态无功支撑能力的机组在故障过程中吸收无功,造成远故障点母线所接入的风电场故障期间电压低于故障点电压,当电压低于0.2pu时,导致具备低电压穿越能力的风机也因低电压脱网。

[0003] 解决风电脱网问题的一个首要任务是确保风电场具有低电压穿越能力。一般情况下,电网故障引起的故障元件(母线、线路、主变等)切除将导致所在局部电网网架结构变弱,当系统要求风电场具备低电压穿越能力时,所有受系统故障影响的风电机组将通过相应控制,尽力恢复至故障前的出力状态,此时会导致局部电网系统的无功损耗急剧增大,若风电场没有充足的动态无功支撑能力,局部电网(风电场级)的电压恢复较慢甚至无法恢复,有可能导致大规模风电场被切除,系统发生大幅度潮流转移,电网电压和频率均受到影响,不利于系统的稳定运行。

[0004] 故障期间风电机组LVRT的能力,主要是通过采用撬棒电路或者chopper电路等硬件实现。根据我国风电并网国家标准要求,只要风电场并网点电压在电网故障期间高于0.2pu,风电机组就需要保持并网运行。因此,如果能够通过风电场的动态无功支撑能力,使并网点电压高于0.2pu,也有助于风电场实现低电压穿越。

[0005] 为保证电网的安全稳定运行,丹麦、德国、西班牙等国对风电场故障期间的动态无功电流注入均作出了要求。例如,德国自从2006年就规定了风电机组需具备动态无功支撑能力。风电机组的动态无功电流 ΔI_B 与机端电压跌落 ΔU_T 成正比,即 $\Delta I_B = k \Delta U_T$;比例系数k的取值范围是 $1 \leq k \leq 10$,k的取值根据不同的电网公司要求而不同。

[0006] 中国风电开发模式与欧洲国家不同,为大容量集中式开发及远距离输送,更易发生系统故障过程中风电失稳现象,引起大规模风电脱网甚至电网电压崩溃事故,因此对风电场动态无功支撑的需求更具有迫切性。国家标准GB/T 19963—2011《风电场接入电力系统技术规定》中要求:当风电场并网点电压处于标称电压的20%~90%区间内时,风电场应能够通过注入无功电流支撑电压恢复;自并网点电压跌落出现的时刻起,动态无功电流控制的响应时间不大于75ms,持续时间应不少于550ms。风电场注入电力系统的动态无功电流 $I_T \geq 1.5 \times (0.9 - U_T) I_N$, ($0.2 \leq U_T \leq 0.9$, U_T 为风电场并网点电压标幺值; I_N 为风电场额定电流)。

[0007] 目前,针对风电场的暂态电压稳定及动态无功注入问题,大多数研发是通过采用 STATCOM 等快速动态无功补偿装置实现动态无功注入,这既增加了风电场的建设费用,又增加了运行维护费用。目前,部分风电场已安装的无功补偿设备出现了不能及时动作的情况,这导致了事故扩大。风电机组也可以在故障期间通过转子侧变流器控制实现动态无功支撑。若能充分挖掘风电机组的动态无功支撑能力,可减轻无功补偿装置在故障期间发无功的压力,降低风电场的建设成本。目前的研究仍存在问题:大多数文献提出的都是故障期间的间接电流控制,即先通过功率控制环再经过电流环控制发出无功功率,由于功率环的时间常数通常是电流环时间常数的 10 ~ 100 倍,动态无功注入存在一定的时间延时,影响了动态无功注入的快速性。

发明内容

[0008] 针对上述问题,本发明提供一种电网故障期间双馈风电机组动态无功电流直接控制方法,该方法可以实现风电机组故障期间向电网快速注入无功电流,提供电压支撑,有助于风电机组实现低电压穿越。

[0009] 实现上述目的所采用的解决方案为:

[0010] 一种直接控制电网故障双馈风电机组动态无功电流的方法,所述方法依次完成下述步骤:判断所述风电机组的机端电压;进入低电压穿越模式;判断转子过流;其改进之处在于:进入直接电流控制模式;低电压穿越状态结束,恢复双闭环控制。

[0011] 进一步的,所述判断机端电压为通过判断并网点电压标幺值是否小于或等于 0.9 确定所述双馈风电机组是否进入低电压穿越模式。

[0012] 进一步的,所述转子过流为变流器过流和/或直流电容过压。

[0013] 进一步的,所述直接电流控制模式包括通过判断转子过流以依次获得:

[0014] I、定子无功电流参考值,

[0015] II、转子无功电流参考值,和

[0016] III、转子有功电流参考值;

[0017] IV、进而断开机侧变频器功率外环,给电流内环赋值。

[0018] 进一步的,所述 I 的获得方法包括以下步骤:

[0019] 1)、确定动态无功电流,即确定故障过程中定子无功电流绝对值,如式(1):

$$[0020] \quad \left| i_{q_stator}^{ref} \right| \geq 1.5 \times (0.9 - U_T) I_N \quad (1)$$

[0021] 2)、确定定子无功电流和转子无功电流绝对值的关系如式(2):

$$[0022] \quad \left| i_{q_stator} \right| = \frac{U_s}{\omega_s L_s} + \frac{L_m}{L_s} \left| i_{q_rotor} \right| \quad (2)$$

[0023] 式中, L_s 为定子自感, L_m 为转子自感, I_N 为风电场额定电流, ω_s 为定子磁链, $i_{q_stator}^{ref}$ 为定子无功电流参考值, i_{q_stator} 为定子无功电流, i_{q_rotor} 为转子无功电流, U_T 为并网点电压, U_s 为定子电压。

[0024] 进一步的,所述 II 的获得方法为:

[0025] 将所述式(1)带入所述式(2),获得如式(3)的国标中对所述转子无功电流参考值

的要求：

$$[0026] \quad \left| i_{q_rotor}^{ref} \right| \geq \frac{L_s}{L_m} 1.5 \times (0.9 - U_T) I_N - \frac{U_s}{\omega_s L_m} \quad (3)$$

[0027] 风电场并网点电压 U_T 等效为定子电压 U_s ，将式(3)写成：

$$[0028] \quad \left| i_{q_rotor}^{ref} \right| \geq \frac{L_s}{L_m} 1.5 \times (0.9 - U_T) I_N - \frac{U_T}{\omega_s L_m}$$

$$[0029] \quad \geq \frac{L_s}{L_m} 1.5 \times (0.9 - U_T) I_N - \frac{U_T - 0.9}{\omega_s L_m} - \frac{0.9}{\omega_s L_m} \quad (4)$$

$$[0030] \quad \geq \left(\frac{L_s}{L_m} 1.5 \times I_N + \frac{1}{\omega_s L_m} \right) (0.9 - U_T) - \frac{0.9}{\omega_s L_m}$$

$$[0031] \quad \geq k'(0.9 - U_T) - c$$

$$[0032] \quad \text{式中, } k' = \left(\frac{L_s}{L_m} 1.5 \times I_N + \frac{1}{\omega_s L_m} \right), c = \frac{0.9}{\omega_s L_m}; L_s \text{ 为定子自感, } L_m \text{ 为转子自感, } I_N \text{ 为风}$$

电场额定电流, ω_s 为定子磁链, $i_{q_stator}^{ref}$ 为定子无功电流参考值, $i_{q_rotor}^{ref}$ 为转子无功电流参考值, U_T 为并网点电压。

[0033] 进一步的,所述 III 的获得为转子电流 d 轴分量的参考值的获得；

[0034] 所述转子电流 d 轴分量的参考值通过故障前变频器的过流能力及无功电流的参考值获得；所述转子有功电流参考值 $i_{q_rotor}^{ref}$ 的计算满足国标要求的无功注入；

[0035] 获得转子无功 / 有功电流参考值分别为：

$$[0036] \quad \begin{cases} \left| i_{q_rotor}^{ref} \right| = k(0.9 - U_T) - c \\ \left| i_{d_rotor}^{ref} \right| = \sqrt{\left(I_{rotor}^{over} \right)^2 - \left(i_{q_rotor}^{ref} \right)^2} \end{cases}$$

[0037] 式中, k 为可变参数,调节风电机组发出的无功电流,补偿将 U_T 等效为风电机组机端电压的误差, k 调节范围为 $k \geq (L_s/L_m) 1.5 \times I_N + 1/(\omega_s L_m)$ ；

[0038] L_s 为定子自感, L_m 为转子自感, I_N 为风电场额定电流, ω_s 为定子磁链, $i_{q_rotor}^{ref}$ 为转子无功电流参考值, $i_{d_rotor}^{ref}$ 为转子有功电流参考值, U_T 为并网点电压, I_{rotor}^{over} 为风电机组能承受的最大过电流。

[0039] 进一步的,所述双闭环控制是指功率外环控制和电流内环控制；

[0040] 所述功率外环控制为定子有功功率参考值与反馈值的偏差经过 PI 调节器得到的转子电流 d 轴分量的参考值,定子无功功率参考值和反馈值的偏差经过 PI 调节器得到转子电流 q 轴分量的参考值；

[0041] 所述电流内环控制为电流误差经调节后输出电压参考值,叠加补偿量,得到的同步旋转坐标系中的转子电压参考值。

[0042] 与现有技术相比,本发明具有以下有益效果：

[0043] (1) 本发明实现风电机组故障期间向电网快速注入无功电流,提供电压支撑,有助

于风电机组实现低电压穿越。

[0044] (2) 本发明减轻无功补偿装置在故障期间发无功的压力,降低风电场的建设成本。

[0045] (3) 本发明采用直接电流控制避免慢速功率环带来的时间延时,实现快速无功注入。

[0046] (4) 本发明可避免在故障期间由于无功注入速度过慢引起的机端电压深度跌落,甚至风机脱网事故。

[0047] (5) 本发明策略实用性强,易于工程实现,不需要增加额外的辅助设备。

[0048] (6) 本发明有助于改善风电机组的并网特性,使风电更好的支撑电网运行。

附图说明

[0049] 图 1 为电网故障期间双馈风电机组动态无功电流直接控制方法的整体流程图;

[0050] 图 2 为 LVRT (低电压穿越) 控制逻辑框图;

[0051] 图 3 为正常运行时双馈风电机组转子侧变流器控制框图;

[0052] 图 4 为增加直接动态无功电流控制功能的双馈风电机组转子侧变流器控制框图;

[0053] 图 5 为加入撬棒电路的双馈风电机组原理图;

[0054] 图 6 为风电场接入电网拓扑结构图;

[0055] 图 7 为采用动态无功电流直接控制的风电机组机端电压、无功电流和无功功率曲线图。

具体实施方式

[0056] 下面结合附图对本发明的具体实施方式做进一步的详细说明。

[0057] 如图 1 所示,图 1 为说明本发明方法的整体流程,电网故障期间双馈风电机组动态无功电流直接控制方法,包括如下步骤:

[0058] a、判断双馈风力发电机机端电压,若跌落则跳至步骤 b,否则跳至步骤 h;

[0059] b、进入低电压穿越模式;

[0060] c、判断电网故障是否引起转子过流,若引起则跳至步骤 d,否则跳至步骤 e;

[0061] d、进入撬棒保护电路;跳至步骤 a;

[0062] e、低电压穿越但未引起保护动作,变频器受控;

[0063] f、直接电流控制模块;

[0064] g、低电压穿越状态结束;

[0065] h、双闭环控制。

[0066] 其中,判断机端电压是判断并网点电压标幺值 U_T 的大小:若 $U_T \leq 0.9$,双馈风机组进入低电压穿越模式;若 $U_T > 0.9$,双馈风电机组正常运行,维持双闭环控制;

[0067] 所述转子过流为变流器过流和/或直流电容过压;

[0068] 所述撬棒保护电路中,投入撬棒保护动作,变流器进入闭锁状态、撬棒保护动作将变流器旁路,风机有功功率和无功功率进入不受控状,直至设定的投入时间结束,风电机组恢复受控状并发出无功功率。

[0069] 如图 2 所示,图 2 为风电机组转子侧变流器的控制逻辑;

[0070] 1) 正常运行时,风电机组采用功率外环、电流内环的双闭环控制方式;

- [0071] 2) 当系统故障引起机端电压跌落,判断是否引起转子过流;
- [0072] a. 若故障期间没有引起保护动作,则风机进入 LVRT 模式下直接电流控制;
- [0073] 无功电流(即转子电流 q 轴分量)的参考值根据风电机组机端电压跌落的深度动态确定;
- [0074] 有功电流(即转子电流 d 轴分量)的参考值根据故障前变频器的过流能力及无功电流的参考值进行设置;
- [0075] b. 若电网故障引起转子变流器过流或直流电容过压,则变流器进入闭锁状态、撬棒保护动作将变流器旁路,此时风机有功功率、无功功率进入不受控状态。
- [0076] 如图 3 所示,图 3 为正常运行时双馈风电机组转子侧变流器双闭环控制图;
- [0077] 功率外环控制为定子有功功率参考值和反馈值的偏差经过 PI 调节器可得到转子电流 d 轴分量的参考值,定子无功功率参考值和反馈值的偏差经过 PI 调节器得到转子电流 q 轴分量的参考值;电流内环控制为电流误差经调节后输出电压参考值,叠加上补偿量,即可得到同步旋转坐标系中的转子电压参考值。
- [0078] 定子电压参考坐标系(SVRF, Stator Voltage Reference Frame)一参考坐标系固定在定子电压相量上,以与定子电压相量相同的转速旋转,其 d 轴方向选择与定子电压方向一致;
- [0079] 转子参考坐标系(RRF, Rotor Reference Frame)一参考坐标系固定在转子上,以转子转速旋转。其 d 轴方向选择与转子相绕组参考方向一致。
- [0080] 由于在 DIgSILENT/PowerFactory 中双馈感应电机模型的电压、磁链方程是以 RRF 为参考坐标系,而控制量是以 SVRF 为参考坐标系的,因此要实现其控制需进行不同坐标系下的坐标转换。
- [0081] 如图 4 所示,图 4 为增加直接动态无功电流控制功能的双馈风电机组转子侧变流器控制框图;为说明故障期间转子侧变流器直接电流控制策略;
- [0082] 在风电机组正常运行期间转子侧变流器仍采用双闭环的控制结构,电流内环的参考值由功率外环给出;在 LVRT 期间,转子侧变流器变为直接电流控制,基本的原则是按国标要求的控制策略尽可能多的发出无功电流;采用直接电流控制可以使控制避免慢速功率环带来的时间延时,实现快速无功注入。
- [0083] 直接电流控制包括以下步骤:
- [0084] 1、根据国标要求和电压跌落幅度获得定子无功电流参考值;
- [0085] 2、根据定转子无功电流的关系获得转子无功电流参考值;
- [0086] 3、根据转子无功电流参考值和变频器过流能力获得转子有功电流参考值;
- [0087] 4、断开机侧变频器功率外环,将转子无功电流参考值赋值给电流内环。
- [0088] 具体来说:
- [0089] 电压跌落到 0.9pu 以下但没有引起转子过流时, LVRT 模式下直接电流控制中的无功电流(转子电流 q 轴分量)的参考值可根据风电机组机端电压跌落的深度动态确定;
- [0090] 由于双馈风电机组通用的控制策略是通过定子发出无功功率,而网侧变流器控制输出的无功功率为零,对动态无功电流的控制可以直接认为是对故障过程中定子无功电流绝对值的控制,即:

$$[0091] \quad \left| i_{q_stator}^{ref} \right| \geq 1.5 \times (0.9 - U_T) I_N \quad (1)$$

[0092] 定子无功电流和转子无功电流绝对值之间的关系如式(2)所示：

$$[0093] \quad \left| i_{q_stator} \right| = \frac{U_s}{\omega_s L_s} + \frac{L_m}{L_s} \left| i_{q_rotor} \right| \quad (2)$$

[0094] 所述电流参考值等效为电流值,式(1)带入式(2),可得国标对转子电流参考值的要求,见式(3)：

$$[0095] \quad \left| i_{q_rotor}^{ref} \right| \geq \frac{L_s}{L_m} 1.5 \times (0.9 - U_T) I_N - \frac{U_s}{\omega_s L_m} \quad (3)$$

[0096] 在国标的规定中, U_T 是风电场并网点电压,在进行控制策略研究时,将其等效为风电机组机端电压,由于机端电压等于定子电压,即 $U_T = U_s$,因此式(3)可写成：

$$[0097] \quad \left| i_{q_rotor}^{ref} \right| \geq \frac{L_s}{L_m} 1.5 \times (0.9 - U_T) I_N - \frac{U_T}{\omega_s L_m}$$

$$[0098] \quad \geq \frac{L_s}{L_m} 1.5 \times (0.9 - U_T) I_N - \frac{U_T - 0.9}{\omega_s L_m} - \frac{0.9}{\omega_s L_m}$$

$$[0099] \quad \geq \left(\frac{L_s}{L_m} 1.5 \times I_N + \frac{1}{\omega_s L_m} \right) (0.9 - U_T) - \frac{0.9}{\omega_s L_m}$$

$$[0100] \quad \geq k'(0.9 - U_T) - c \quad (4)$$

$$[0101] \quad \text{式中, } k' = \left(\frac{L_s}{L_m} 1.5 \times I_N + \frac{1}{\omega_s L_m} \right), \quad c = \frac{0.9}{\omega_s L_m}。$$

[0102] 电压跌落到 0.9pu 以下但没有引起转子过流时, LVRT 模式下直接电流控制中的有功电流(转子电流 d 轴分量)的参考值可根据故障前变频器的过流能力及无功电流的参考值进行设置：

[0103] 转子无功电流参考值 $i_{q_rotor}^{ref}$ 按照式(4)计算,而转子有功电流参考值 $i_{d_rotor}^{ref}$ 的计算原则是在满足国标要求的无功注入的前提下,尽可能多的发出有功电流。在控制中,可以将 k' 设置成可变参数 k , 根据实际情况,调节风电机组发出的无功电流,补偿将 U_T 等效成风电机组机端电压带来的误差,其调节范围是 $k \geq (L_s/L_m) 1.5 \times I_N + 1/(\omega_s L_m)$ 。

[0104] 转子无功 / 有功电流参考值的公式如式(5), I_{rotor}^{over} 是风电机组能承受的最大过电流：

$$[0105] \quad \begin{cases} \left| i_{q_rotor}^{ref} \right| = k(0.9 - U_T) - c \\ \left| i_{d_rotor}^{ref} \right| = \sqrt{(I_{rotor}^{over})^2 - (i_{q_rotor}^{ref})^2} \end{cases} \quad (5)$$

[0106] 上述式子中, $k = \left(\frac{L_s}{L_m} 1.5 \times I_N + \frac{1}{\omega_s L_m} \right)$, $c = \frac{0.9}{\omega_s L_m}$, L_s 为定子自感, L_m 为转子自感, I_N

为风电场额定电流, ω_s 为定子磁链, $i_{d_rotor}^{ref}$ 为转子有功电流参考值, $i_{q_rotor}^{ref}$ 为转子无功电流

参考值, U_T 为并网点电压, I_{rotor}^{over} 为风电机组能承受的最大过电流。

[0107] 如图 5 所示, 图 5 为加入撬棒电路的双馈电机系统原理图;

[0108] 转子撬棒保护(Crowbar Protection)是双馈感应发电机为了防止故障情况下转子绕组过电流导致的转子侧变流器过电流烧毁而专门设置的保护措施。当故障过程中转子电流超过设定的门槛值时, 转子侧变流器闭锁、转子绕组通过外接附加阻抗旁路。附加旁路阻抗能够降低感应发电机吸收的无功功率并改善电网故障电压跌落期间发电机的转矩特性。撬棒保护动作后, 转子侧外加电压源被附加阻抗短接, 双馈感应发电机的主开关并不动作, 双馈感应发电机仍并网运行, 不具有控制能力, 其运行类似于普通异步发电机, 会从电网吸收无功功率。转子的过电流不会流过转子侧变流器, 保护目的得以实现; 但是由于双馈电机失去控制能力, 对于故障后的电压恢复不利。撬棒保护动作直至设定的投入时间结束, 使风电机组尽快恢复受控状态并发出无功功率。

[0109] 如图 6 所示, 图 6 为风电场接入电网拓扑结构图;

[0110] 图中所示某风电场容量为 49.5MW, 由 33 台 1.5MW 的双馈风电机组组成。风电场通过 35kV/220kV 主变压器接入含风电群及常规电厂的电力系统, 风电场送出线长度为 10km。电网故障期间, 风电使用直接电流控制, 实现故障期间风电机组向电网快速注入无功电流, 提供电压支撑, 风电机组实现低电压穿越。

[0111] 图 7 为采用直接和间接动态无功电流控制时的风电机组机端电压、无功电流和无功功率曲线图; 体现了风电机组采用无功电流直接控制的优越性, 图 7 中实线给出了采用直接电流控制时的风电机组机端电压, 无功功率和无功电流曲线, 而虚线则是采用间接电流时的结果。由图可知, 当采用间接电流控制时, 风电机组从检测出故障到发出动态无功功率有大约 50ms 的时间延迟, 这段期间电压会因为缺少无功支撑而深度跌落。而采用直接电流控制时, 风电机组可以快速发出无功电流, 进而快速向电网注入无功功率, 避免故障期间电压的深度跌落, 机端电压一直高于 0.2pu, 风电机组保持并网运行。

[0112] 最后应当说明的是: 以上实施例仅用于说明本申请的技术方案而非对其保护范围的限制, 尽管参照上述实施例对本申请进行了详细的说明, 所属领域的普通技术人员应当理解: 本领域技术人员阅读本申请后依然可对申请的具体实施方式进行种种变更、修改或者等同替换, 但这些变更、修改或者等同替换, 均在申请待批的权利要求保护范围之内。

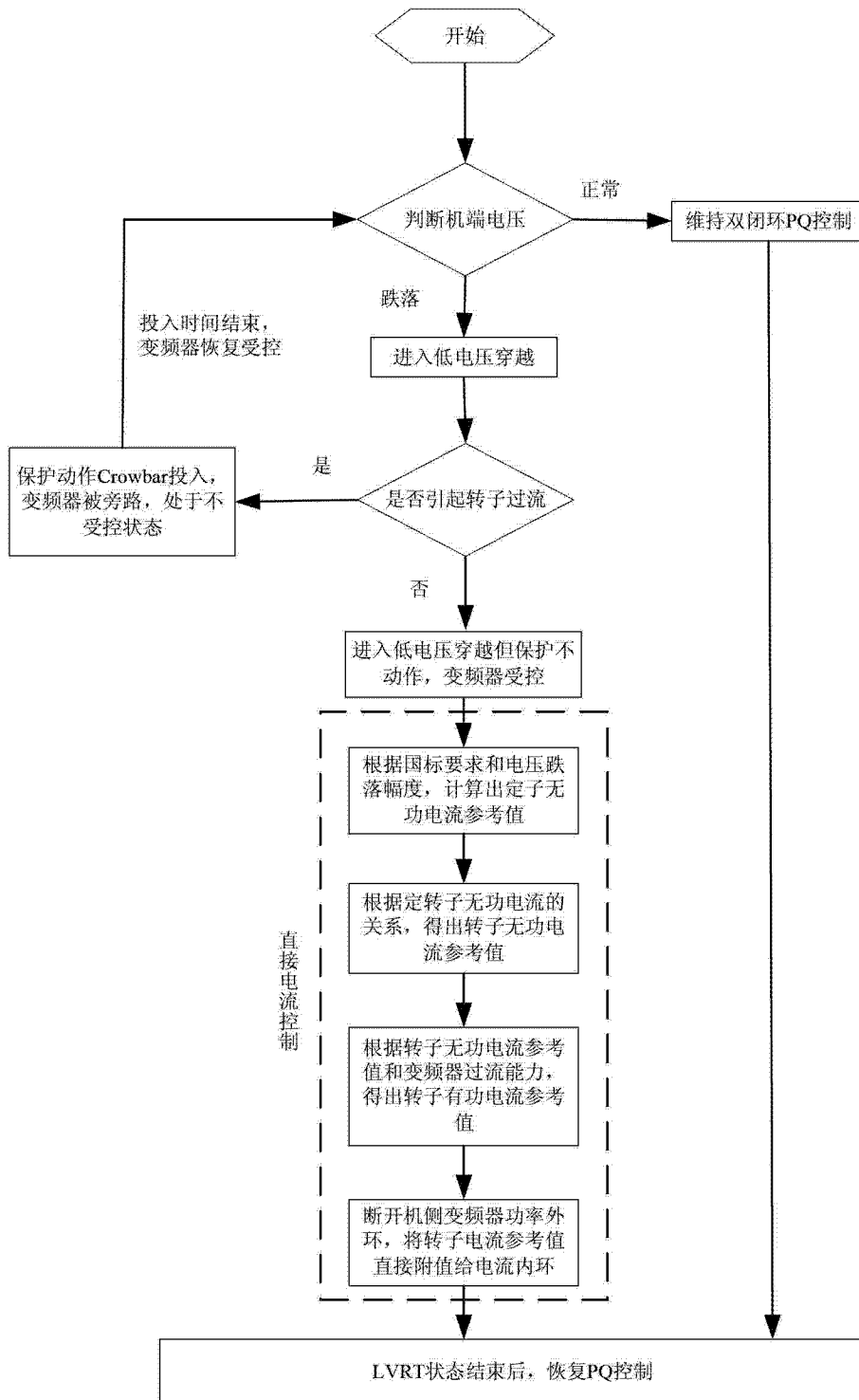


图 1

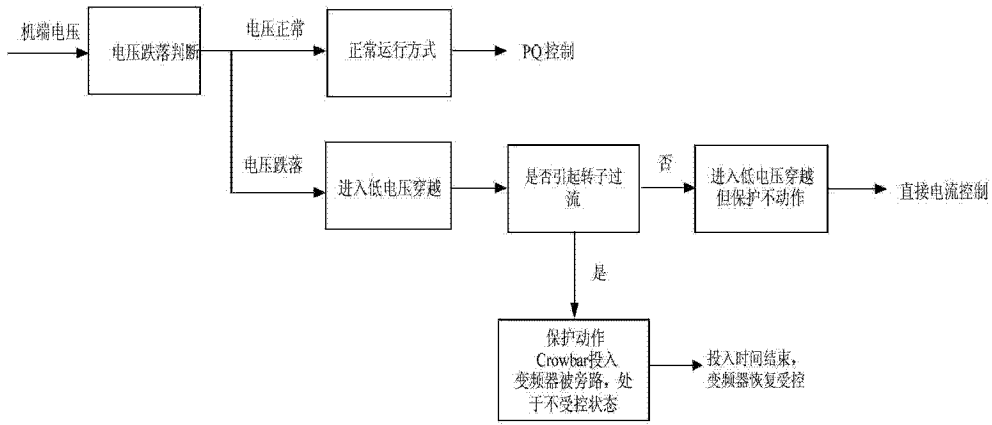


图 2

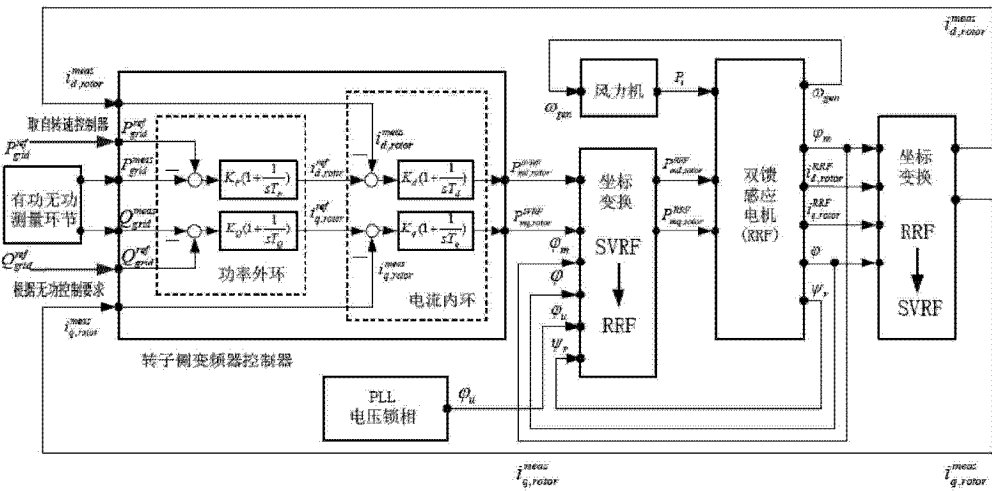


图 3

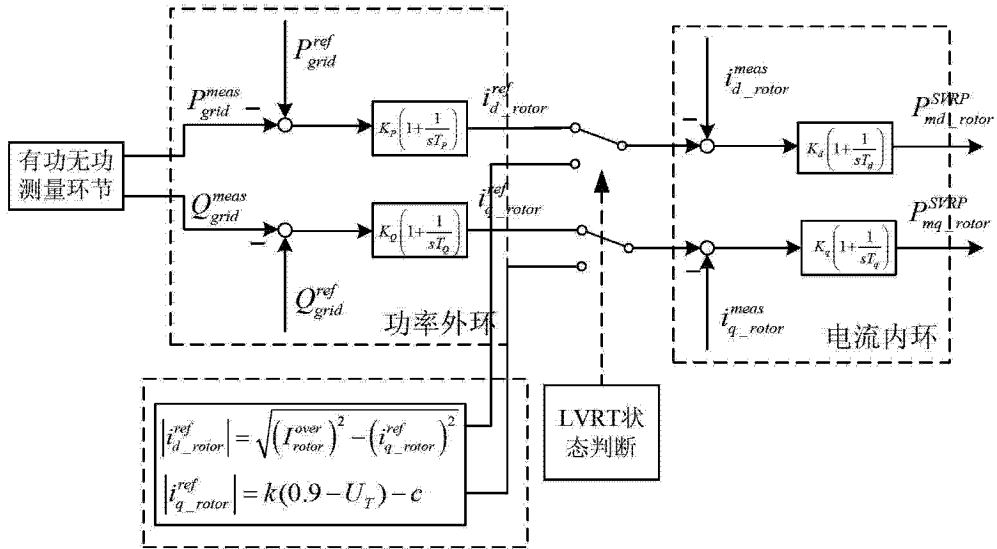


图 4

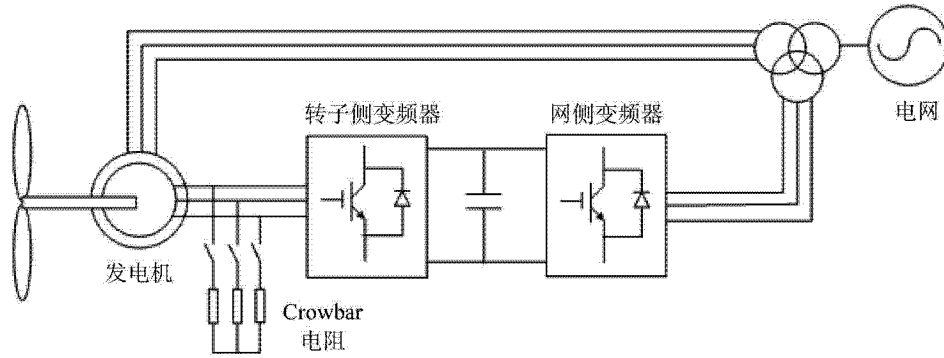


图 5

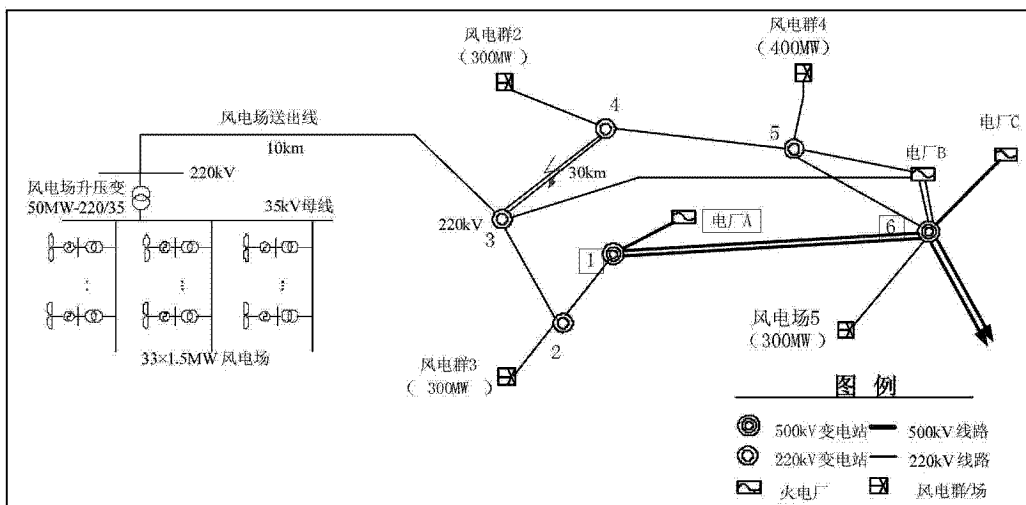


图 6

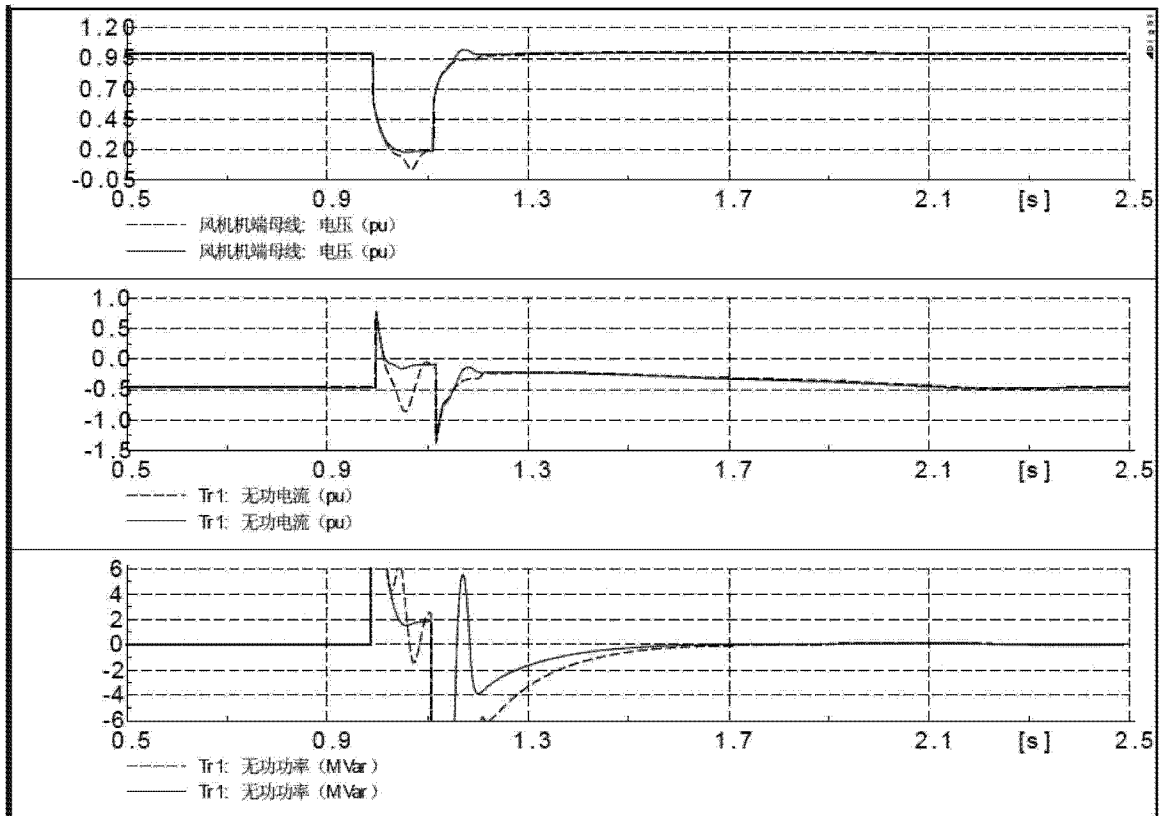


图 7