

永磁直驱风机改进低电压穿越协调控制策略

电网不对称故障发生后,采用已有的平衡控制策略,在维持并网有功稳定输出的同时无法消除直流侧电压的两倍工频谐波,且难以保证并网电流处于安全范围内。为此提出一种适用于永磁直驱风机的改进低电压穿越协调控制策略。该策略在低压暂态期间利用机侧变流器追踪并网输出有功,确保直流侧两端功率基本平衡;通过在直流侧增加电压前馈控制环节,抑制了直流侧电压波动;利用电压跌落因子修正网侧变流器电流参考指令,防止并网电流越限。仿真结果表明,该策略在维持并网有功稳定输出下,较好地抑制了直流侧电压波动,同时降低了并网电流幅值,提高了机组的低电压穿越能力。

叶超^{1,2} 杨苹^{1,2,3} 宋嗣博¹ 张育嘉¹/1.华南理工大学电力学院 2.广东省绿色能源技术重点实验室 3.风电控制与并网技术国家地方联合工程实验室

0 引言

近年来,风电并网比重逐步提升,随之带来了巨大的经济效益。但是随着风电规模的扩大,因电网故障造成的风机脱网事故发生频繁^[1-2]。

永磁直驱同步风机(PMSG)由于其结构简单、机械损耗小和整体可靠性高等优点,受到了越来越多人的关注^[3-4]。文献[5]通过在PMSG中增加能量泄放回路来消耗电网电压暂降期间直流侧的不平衡能量,以防止直流侧电容过电压和网侧变流器过电流,但额外的硬件设备不仅会增加投入成本,而且不利于后期维护;文献[6]采用对称控制方式,通过

控制并网电流负序分量为零来实现机组的低电压穿越,但其直流侧端电压存在的两倍工频谐波分量,不仅会危及变流器的运行稳定性,而且影响电容的使用寿命。基于正、负序双电流内环独立控制的控制策略^[7],可消除并网有功功率中的波动分量,不过其并未考虑网侧电抗器吸收功率带来的影响,PI调节器无法真正实现无静差跟踪控制,直流侧电容端电压仍会波动,因此有必要对其进行改进。

基于对已有平衡控制策略控制不足的分析,为了能够兼顾并网有功稳定输出和直流侧电压无波动,同时限制并网电流幅值,提出了一种适用于PMSG的改进低电压穿越协调控制策略。基于Matlab/Simulink平台,搭建了仿真模型,通过对电网单相短路故障的仿真分析,验证了所提控制策略的正确性。

1 已有平衡控制策略及问题

1.1 电网故障下网侧变流器控制策略

双PWM型永磁直驱风力发电系统如图1所示。

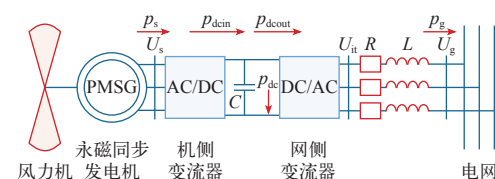


图1 双PWM型永磁直驱风力发电系统结构图

电网不对称故障时,网侧变流器输出复功率矢量为^[8-9]



叶超/硕士研究生

关键词/Keywords

不对称故障·
两倍工频谐波·
永磁直驱风机·
低电压穿越·
协调控制·

国家科技支撑计划(2015BAA06B02),广东省科技计划项目(2012B040303005),南沙区科技计划项目资助(2013P005);风电控制与并网国家与地方联合工程实验室配套。

$$S = U_g I_g^* = 3/2 (U_{dq}^P e^{j\omega t} + U_{dq}^N e^{-j\omega t}) (I_{dq}^P e^{j\omega t} + I_{dq}^N e^{-j\omega t}) \quad (1)$$

式中, U_g 、 I_g 为电网电压、并网电流; I_g^* 为 I_g 的共轭矢量; ω 为电网相电压的角频率; U_{dq}^P 、 U_{dq}^N 和 I_{dq}^P 、 I_{dq}^N 分别为同步旋转坐标系下 U_g 和 I_g 的正序、负序复矢量, 且 $U_{dq}^P = U_d^P + jU_q^P$, $U_{dq}^N = U_d^N + jU_q^N$, $I_{dq}^P = I_d^P + jI_q^P$, $I_{dq}^N = I_d^N + jI_q^N$ 。

将式(1)写成有功功率 p_g 和无功功率 q_g 的形式, 即

$$S = p_s + jq_s = [p_0 + p_1 \cos(2\omega t) + p_2 \sin(2\omega t)] + j[q_0 + q_1 \cos(2\omega t) + q_2 \sin(2\omega t)] \quad (2)$$

式中, p_0 、 q_0 为有功、无功功率的直流分量; p_1 、 p_2 为有功余弦、正弦2次谐波分量的幅值; q_1 、 q_2 为无功余弦、正弦2次谐波分量的幅值。

综合式(1)、式(2), 可得

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \\ q_0 \\ q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} = \frac{3}{2} \begin{pmatrix} U_d^P & U_q^P & U_d^N & U_q^N \\ U_d^N & U_q^N & U_d^P & U_q^P \\ U_q^N & -U_d^N & -U_q^P & U_d^P \\ U_q^P & -U_d^P & U_q^N & -U_d^N \\ U_q^N & -U_d^N & U_q^P & -U_d^P \\ -U_d^N & -U_q^N & U_d^P & U_q^P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_d^P \\ I_q^P \\ I_d^N \\ I_q^N \end{pmatrix} \quad (3)$$

为消除并网有功功率中的两倍工频谐波分量, 可令谐波幅值 p_1 与 p_2 为零, 代入式(3)并进行矩阵运算, 可得到网侧变流器的内环电流控制指令, 即

$$\begin{cases} I_d^{P*} = \frac{2p_0}{3D} U_d^P \\ I_q^{P*} = \frac{2q_0}{3D} U_q^P \\ I_d^{N*} = -\frac{2p_0}{3D} U_d^N \\ I_q^{N*} = -\frac{2q_0}{3D} U_q^N \end{cases} \quad (4)$$

其中, $D = [(U_d^P)^2 + (U_q^P)^2] - [(U_d^N)^2 + (U_q^N)^2]$ 。

忽略网侧变流器自身损耗的功率及并网电抗器吸收的功率时, 采用上述控制策略, 可在消除并网有功2次谐波分量的同时, 维持直流侧电压稳定。

1.2 网侧电抗器吸收功率对直流侧电压影响分析

实际应用中, 兆瓦级机组的并网电流较大, 在电网故障期间, 电流幅值会进一步增大, 这时网侧电抗器吸收的功率便不能忽略不计。为了得到更加合理的低电压穿越控制策略, 有必要对电抗器吸收功率造成的影响进行研究。

电网不对称故障时, 网侧电阻、电感吸收的复功率 S_R 、 S_L 分别为

$$\begin{cases} S_L = U_L I_g^* = L \frac{dI_g}{dt} I_g^* \\ S_R = U_R I_R^* = R I_g I_g^* \end{cases} \quad (5)$$

求解式(5), 可得到网侧电抗器吸收的有功

$$\begin{cases} p_d = p_{d0} + p_{d1} + p_{d2} \\ p_{d0} = \frac{3}{2} R \left[(I_d^P)^2 + (I_q^P)^2 + (I_d^N)^2 + (I_q^N)^2 \right] \\ p_{d1} = 3 \left[R (I_d^P I_d^N + I_q^P I_q^N) + \omega L (I_d^P I_q^N - I_q^P I_d^N) \right] \\ p_{d2} = 3 \left[R (I_d^P I_q^N - I_q^P I_d^N) - \omega L (I_d^P I_d^N + I_q^P I_q^N) \right] \end{cases} \quad (6)$$

式中, p_d 为电抗器吸收的有功功率; p_{d0} 为 p_d 的直流分量; p_{d1} 、 p_{d2} 分别为 p_d 的两倍工频余弦、正弦谐波分量的幅值。

根据直流侧电容两端功率平衡的原则可得

$$\begin{cases} p_{dcin} = p_{dc} + p_{dcout} \\ p_{dc} = C U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} \\ p_{dcout} = p_d + p_g \end{cases} \quad (7)$$

式中, p_{dc} 为直流电容瞬时有功功率; p_{dcin} 、 p_{dcout} 分别为直流侧输入端和输出端的有功功率; U_{dc} 为电容端电压。

采用已有的控制策略时, p_g 中的两倍工频谐波分量被消除, 只剩下直流分量, 即 $p_g = p_0$, 将其代入式(7)可得

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{p_{dcin} - p_0 - (p_{d0} + p_{d1} + p_{d2})}{C U_{dc}} \quad (8)$$

由式(8)可知, p_d 中的两倍工频谐波分量 p_{d1} 和 p_{d2} 将导致电容端电压 U_{dc} 波动。

可见, 当电抗器吸收的有功功率 p_d 不能忽略

时, 在实现并网有功功率 p_g 无两倍工频谐波的同时, 无法维持直流侧电压稳定。

2 PMSG改进低电压穿越协调控制策略

2.1 直流侧增加电压前馈控制环节

电网不对称故障发生时, 永磁直驱发电机的输出有功将发生变化, 此时若能及时地改变网侧电流 d 轴正序分量的给定值, 使网侧变流器与机侧变流器的输出有功一致, 就能避免不平衡能量在直流侧积累, 从而维持直流侧电压稳定。但由于直流侧电容是一个较大的惯性环节, 降低了电压外环的响应速度, 经PI调节器输出的电流参考指令无法快速跟踪 p_s 的变化, 因此有必要对网侧变流器的直流侧电压控制进行改进。

重新求解式(7)并将其变形为

$$p_{\text{dcout}} = p_{\text{dcin}} - p_{\text{dc}} \quad (9)$$

$$I_{\text{dcout}} = \frac{p_{\text{dcout}}}{U_{\text{dc}}} = -C \frac{dU_{\text{dc}}}{dt} + \frac{U_{\text{sd}} I_{\text{sd}} + U_{\text{sq}} I_{\text{sq}}}{U_{\text{dc}}} \quad (10)$$

式中, I_{dcout} 为直流侧输出端电流; U_{sd} 、 U_{sq} 和 I_{sd} 、 I_{sq} 为发电机定子电压和电流的 d 轴、 q 轴分量。

式(10)右端第二项反映了永磁同步发电机输出有功的变化, 将其作为前馈补偿量并与外环电压PI调节器的输出共同作为网侧变流器电流 d 轴正序分量参考值时, 可保证 d 轴电流快速地跟踪参考电流, 实现机侧、网侧变流器输出有功基本一致, 从而减小直流侧电压波动。直流侧电压增加前馈控制环节的控制结构图如图2所示。

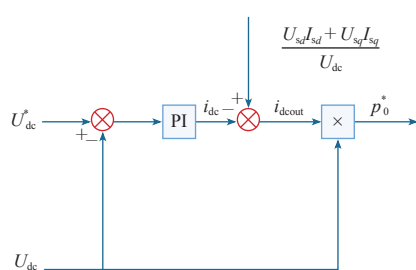


图2 增加前馈控制环节的直流侧电压控制结构图

2.2 网侧变流器电流参考指令修正

电网不对称故障发生后, 网侧变流器采用已有的平衡控制策略, 并未对网侧变流器的参考值

进行限制, 因此网侧合成电流的幅值仍有可能超出安全范围。为确保并网电流不超限, 有必要对网侧变流器的电流参考指令进行修正。

电压暂态期间, 并网电流的幅值应被限制为

$$\sqrt{(I_d^p)^2 + (I_q^p)^2} + \sqrt{(I_d^N)^2 + (I_q^N)^2} \leq I_{\text{max}} \quad (11)$$

显然, 如果对四个电流参考值同时进行限制, 难度较大。式(4)中, 电流参考值 I_d^{p*} 、 I_d^{N*} 、 I_q^{N*} 和有功功率参考值 p_0 有关, 而在电网故障期间, p_0 将随电网电压的跌落而减小, 因此可考虑利用电网电压的跌落因子 k 来修正有功功率参考值 p_0

$$k = \left[\sqrt{(U_d^p)^2 + (U_q^p)^2} - \sqrt{(U_d^N)^2 + (U_q^N)^2} \right] / U_d \quad (12)$$

式中, U_d 为正常情况下电网电压的 d 轴分量。

此外, 电流参考值 I_q^{p*} 与系统输出的无功功率 q_0^* 有关, 因此有必要对无功参考值进行修正, 为

$$q_0^* \leq q_{\text{max}} = k \sqrt{S_{\text{max}}^2 - p_0^2} \quad (13)$$

式中, S_{max} 为网侧变流器输出视在功率的最大上限值, 取 $S_{\text{max}} = 1.2 P_{\text{max}}$, P_{max} 为正常情况下网侧变流器输出的最大有功功率值。

至此, 可得修正后网侧变流器电流参考令值为

$$\begin{cases} I_d^{p*} = \frac{2(kp_0)}{3D} U_d^p \\ I_q^{p*} = \frac{2q_0^*}{3D} U_q^p \\ I_d^{N*} = -\frac{2(kp_0)}{3D} U_d^N \\ I_q^{N*} = -\frac{2(kp_0)}{3D} U_q^N \end{cases} \quad (14)$$

图3为内环电流参考值经修正后的网侧变流器控制结构图。

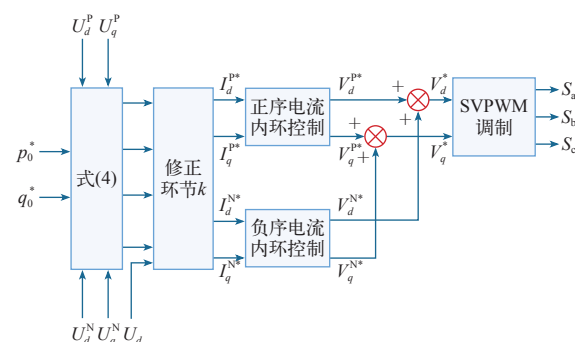


图3 带修正环节的网侧变流器控制结构图

2.3 基于功率平衡思想的机侧变流器控制

电网故障期间,直流侧输入端功率 p_{dcin} 将大于输出端功率 p_{dcout} ,如果不采取适当的控制策略,容易造成不平衡能量在电容上累积,严重时甚至烧毁电容。为了不附加额外的硬件设备,由式(7)可知,可在低压暂态期间调整机侧变流器的输出功率 p_s ,并使其与网侧变流器输出有功 p_g 保持一致,避免大量不平衡能量在直流侧积累,防止直流侧电压越限。

基于功率平衡思想的机侧变流器控制结构图如图4所示。

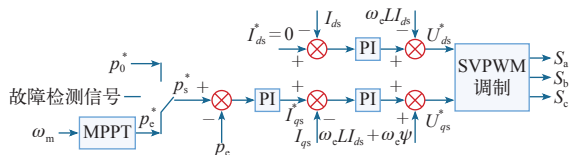


图4 基于功率平衡思想的机侧变流器控制结构图

3 仿真实验

3.1 仿真参数

为验证所提出控制策略的正确性,基于Matlab平台搭建了额定功率为1 MW的PMSG仿真模型。基本参数为:定子额定电压为690 V,极对数为40,定子电阻为1 mΩ,交、直轴电感为1.5 mH,直流侧电容为50 mF,并网电抗器电阻为0.01 Ω、电感为0.4 mH^[10]。

3.2 仿真分析

在已有平衡控制策略和所提出的控制策略下进行仿真。仿真结果如图5、图6所示。

图5为PMSG采用已有平衡控制策略时的仿真结果。由图5a可知,0.3~0.5 s间电网发生单相接地短路故障,单相电压幅值跌落至额定值的30%。电网发生故障后,通过使无功余弦、正弦两倍工频谐波分量参考值为零,实现了并网有功的稳定输出,如图5b所示。但由于网侧电抗器吸收功率对直流侧端电压的影响,直流侧端电压两倍工频谐波分量较大,波动分量的幅值约为23 V,如图5c所示。此外,由于其未对网侧变流器电流参考指令进行限制,并网电流幅值较大,约超出

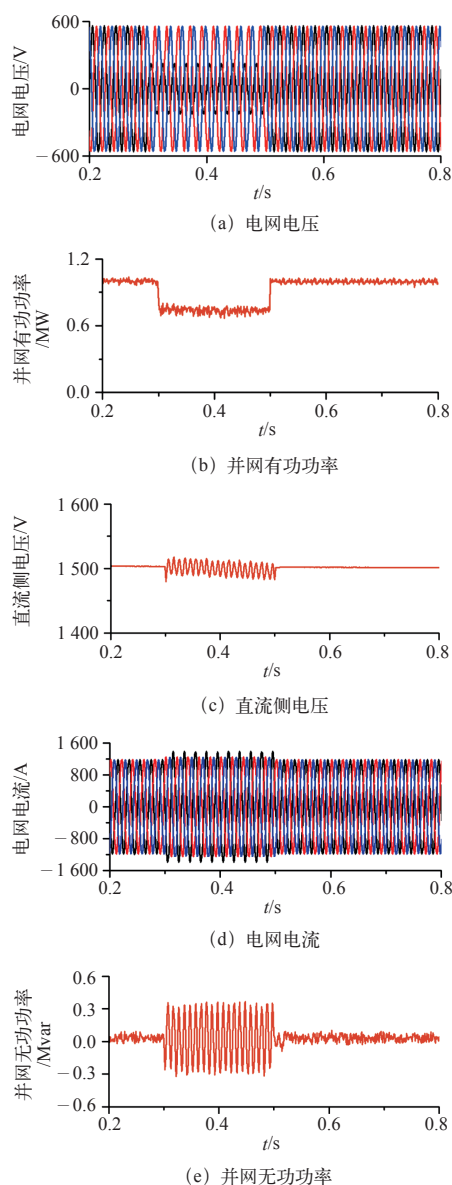


图5 已有平衡控制策略下的仿真结果

额定值的12%,如图5d所示。随着电网电压跌落程度和不平衡度的加深,并网电流幅值存在越限的可能。

图6为PMSG在本文控制策略下的仿真结果。在电网不对称故障发生后,由于网侧变流器电流参考指令被及时修正,相比已有的平衡控制策略,并网电流幅值有所降低,被限制在额定值附近,如图6a所示。由于网侧电流幅值降低,网侧变流器输出有功略有减少,如图6b所示。通过在直流侧增加电压前馈控制环节,真正实现了直流侧两端的功率平衡,降低了直流侧电容端电压中的

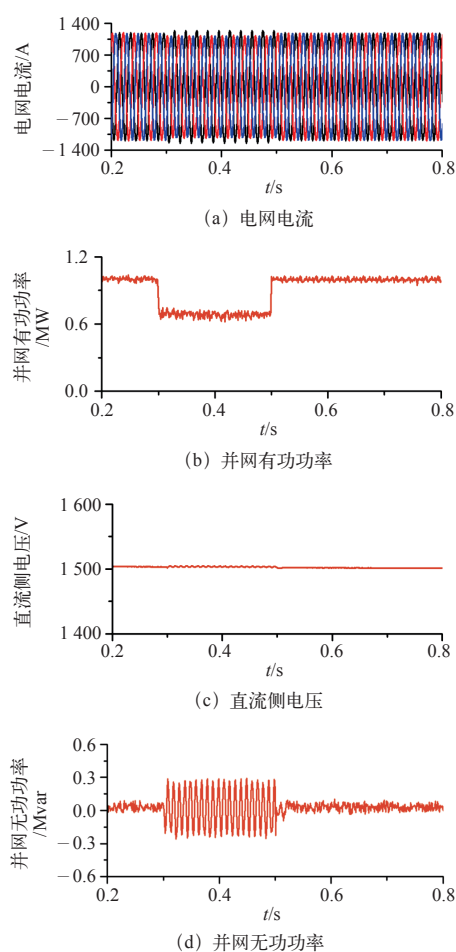


图6 本文控制策略下的仿真结果

谐波分量幅值,由原有的23 V降至7 V,不仅提高了变流器的工作稳定性,而且可避免电容因频繁过充放电而降低使用寿命,如图6c所示。

限于篇幅,此处仅给出电网单相短路故障的仿真结果,对于电网两相短路故障,也可得到相似的结果。

4 结束语

针对已有平衡控制策略的不足,提出以降低直流侧电压波动分量幅值、限制并网电流幅值为目标的永磁直驱风机改进低电压穿越协调控制策略,仿真结果表明:

1) 已有的平衡控制策略并未考虑网侧电感器吸收功率带来的影响,在维持并网有功稳定输出时,直流侧电压波动分量较大。

2) 通过在直流侧增加前馈控制环节,可在电

压跌落初期即将机侧变流器输出有功改变信息传递至网侧变流器,确保直流侧两端功率平衡,从而降低直流侧电压波动分量幅值。

3) 利用电压跌落因子修正并网电流参考指令,在牺牲少许并网输出有功下,并网电流幅值被限制在额定值附近,可避免网侧变流器过电流保护,更加有利于机组实现低电压穿越。

参考文献

- [1] 徐天赐,吴峰,金字清,等.基于非电气参数的风电场等效建模方法对比研究[J].可再生能源,2013,31(3):40-45.
- [2] 姚骏,陈西寅,廖勇,等.抑制负序和谐波电流的永磁直驱风电系统并网控制策略[J].电网技术,2011,35(7):29-35.
- [3] 刘忠义,刘崇茹,李庚银.提高直驱永磁风机低电压穿越能力的功率协调控制方法[J].电力系统自动化,2015,39(3):23-29.
- [4] 朱小军,姚骏,蒋昆,等.电网不对称故障下含飞轮储能单元的永磁直驱风电系统增强运行控制策略[J].电网技术,2013,37(5):1454-1463.
- [5] 黄守道,肖磊,黄科元,等.不对称电网故障下直驱型永磁风力发电系统网侧变流器的运行与控制[J].电工技术学报,2011,26(2):173-180.
- [6] 贾波,张辉.直驱永磁同步风电系统低电压穿越控制策略[J].电力系统及其自动化学报,2015,27(2):15-19.
- [7] 姚骏,陈西寅,廖勇,等.电网电压不平衡时永磁直驱风电机组的控制策略[J].电力系统保护与控制,2011,39(14):99-106.
- [8] 肖磊,黄守道,黄科元,等.不对称电网故障下直驱永磁风力发电系统直流母线电压稳定控制[J].电工技术学报,2010,25(7):123-129,158.
- [9] 陆振纲.直驱型风力发电机组网侧变流器低电压穿越及电压不平衡运行仿真研究[D].北京:中国电力科学研究院,2010.
- [10] 王文亮.储能型永磁直驱风力发电系统并网运行控制研究[D].北京:北京交通大学,2010.

(收稿日期:2016-01-25) EA