

改善基于双馈感应发电机的并网风电场 暂态电压稳定性研究

迟永宁, 王伟胜, 戴慧珠

(中国电力科学研究院, 北京市海淀区 100085)

Study on Transient Voltage Stability Enhancement of Grid-connected Wind Farm With Doubly Fed Induction Generator Installations

CHI Yong-ning, WANG Wei-sheng, DAI Hui-zhu

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100085, China)

ABSTRACT: Measures to enhance transient voltage stability of grid-connected wind farm based on variable speed wind turbines equipped with doubly fed induction generator (DFIG) are presented to implement low voltage ride through (LVRT) characteristic. Because mostly used variable speed wind turbines based on DFIG do not provide with transient voltage support capability under fault conditions, the security and stability of grid is influenced by wind farms integration in the case of severe short circuit fault contingency occurred on the grid side. The power converter controller model with transient voltage support capability and pitch control model used for post-fault stability control are implemented in DigSILENT/PowerFactory. The models validation and the contribution to transient voltage stability enhancement are verified by power system simulation containing large wind farms. From simulation results, it can be illustrated that power converter controller with transient voltage support capability should provide dynamic reactive power to support grid voltage; the pitch control of variable speed wind turbines should effectively reduce mechanical power, preventing wind turbines from over-speeding in the duration of power system large disturbance. The conclusion is presented that adoption of power converter controller with transient voltage support capability and pitch control used for post-fault stability control enhances transient voltage stability of grid-connected wind farm, ensures low voltage ride through capability of variable speed wind turbines equipped with DFIG and the security of the grid.

KEY WORDS: wind power integration; doubly fed induction generator; transient voltage stability; low voltage ride through; power converter controller; pitch control

摘要: 提出了改善基于双馈感应发电机的并网风电场暂态电压稳定性的措施以实现风电场的低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)功能。目前,大部分基于双馈感应发电机的变速风电机组不具有故障情况下的暂态电压支持能力,当电网侧发生严重短路故障时,风电场的暂态电压稳定能力会影响到电网安全稳定。该文在 DigSILENT/PowerFactory 中建立了具有暂态电压支持能力的变速风电机组转子侧变频器控制模型及用于故障后稳定控制的桨距角控制模型,通过包含风电场的电力系统仿真计算验证了模型的有效性及其对风电机组和电网暂态电压稳定性的贡献。仿真结果表明,当电网侧发生三相短路故障时,风电机组转子侧变频器暂态电压控制能够控制风电机组发出无功功率支持电网电压;桨距角控制能有效降低变速风电机组机械转矩,避免出现风电机组超速及电压失稳。得出结论:采用变频器暂态电压控制及桨距角控制能够改善基于双馈感应发电机的并网风电场的暂态电压稳定性,确保风电机组低电压穿越(LVRT)功能的实现及电网安全稳定。

关键词: 风电接入; 双馈感应发电机; 暂态电压稳定; 低电压穿越; 变频器控制器; 桨距控制

0 引言

基于双馈感应发电机(doubly fed induction generator, DFIG)的变速风电机组由于具有变速运行的特性,能提高风电机组的风能转换效率,实现最大风能捕获并减小风电机组机械部件所受应力^[1-2];能通过变频器控制系统将发电机有功、无功功率实现解耦控制,改善风电场功率因数及电压稳定性^[3-5],因此近几年逐步取代了基于普通异步发电机的恒速风电机组成为世界风电市场上的主流机型。目前,正常控制策略下的大部分双馈风电机组控制系

统在电网侧发生大扰动故障如三相短路时,无法提供动态电压支持,另外由于故障线路切除,导致电网结构更弱,机端电压降低。风电机组有功功率无法完全送出,其机械转矩大于电磁转矩会引起风电机组超速,而导致整个风电场内所有风电机组超速保护动作将风电机组切除,影响到了风电场的运行及电网的安全,因此有必要研究改善基于双馈感应发电机并网风电场暂态电压稳定性的措施。

在风电发展初期,由于风电在电网中所占的比例很小,一般不要求风电场参与电力系统控制。当电网侧发生故障时,由于风电场本身的暂态电压稳定性无法保证,通常都采用切除风电机组的措施来保证风电场及电网的安全。随着风电机组技术的进步及风电在电网中所占比例的迅速提高,目前多个国家的风电并网导则都对风电场提出了要求^[6]:在规定的故障及电网电压跌落期间,保证一定时间范围内风电场能连续运行而不脱离电网,甚至要求风电场在电网故障发生后发出无功功率参与电网电压控制。如从2003年开始,德国E.on电网公司除了要求故障后电网电压恢复期间风电场必须保持并网运行外,还要求风电机组动态发出无功功率以支持电网电压,防止风电机组由于电压过低导致的跳闸。风电场的这种故障期间保持不间断并网运行的能力称为风电场的低电压穿越能力(low voltage ride through, LVRT)。文献[7-10]研究了基于双馈感应发电机的变速恒频风电机组动态数学模型及励磁控制策略,实现了发电机有功功率和无功功率的解耦控制。文献[11-12]提出了一种电网对称故障下保持双馈感应风力发电机不脱网运行的新型励磁控制策略,以实现电网故障期间风电机组的不间断运行。上述研究未对故障期间如何发挥风电机组的动态无功支持能力进行探讨,并且仅考虑了电磁控制的作用而忽略了对风电机组机械转矩的控制。实际上,当不对风电机组进行控制以降低机械转矩时,往往还会由于转矩不平衡导致风电机组超速并切除,无法真正实现风电机组的低电压穿越功能。因此,风电机组的低电压穿越功能需要依靠电磁控制与机械控制的综合控制系统共同作用,提高风电机组本身运行的稳定性及其暂态电压稳定性来实现。

以提高双馈风电机组暂态电压稳定性为目的,在DIgSILENT/PowerFactory中将具有暂态电压控制能力的变速风电机组转子侧变频器控制模型及用于故障后稳定控制的桨距角控制模型加入风电

机组综合控制模型中,作为电网故障方式下风电场的控制手段以改善风电场暂态电压稳定性,实现风电场低电压穿越功能;通过含风电场的电力系统仿真计算验证了模型有效性及其对基于双馈感应发电机的并网风电场和电网暂态电压稳定性的贡献,验证了其对于风电场实现低电压穿越功能的必要性。

1 基于双馈感应发电机的风电机组模型

1.1 空气动力模型

风力发电机组空气动力学数学模型^[13-17]为

$$P_M = P_{\text{wind}} = \rho C_p(\lambda, \beta) \pi R^2 V_w^3 / 2 \quad (1)$$

式中: P_M 为风电机组从风中获取的能量转化成的风电机组机械功率; ρ 为空气密度; R 为风力机叶轮半径; λ 为叶尖速比; β 为桨距角; C_p 为叶片的风能转换效率系数,是 λ 与 β 的函数,改变 λ 与 β 可以改变 C_p 的大小; V_w 为风速。

1.2 轴系模型

在正常稳态运行方式下,变速风电机组通过其解耦控制实现了机械部分与电气部分的解耦,轴系扭振基本上通过变频器滤除。但当电网出现严重故障如三相短路故障时,其轴系振荡就会表现出来,这只有通过发电机与风力机质块惯量的详细模拟才能反映出来,因此在风电机组建模时需要采用风力机与发电机的两质块模型来表示轴系。两质量块数学模型方程^[15, 17-18]可表示为

$$\begin{cases} 2H_T d\omega_T / dt = T_M - K_S \theta_S - D_T \omega_T \\ 2H_G d\omega_G / dt = K_S \theta_S - T_E - D_G \omega_G \\ d\theta_S / dt = \omega_0 (\omega_T - \omega_G) \end{cases} \quad (2)$$

式中: H_T 、 H_G 为风力机、发电机惯量; K_S 为轴的刚度系数; D_T 、 D_G 为风力机转子与发电机转子的阻尼系数; θ_S 为两质块之间相对角位移; T_M 、 T_E 为风力机机械转矩与发电机电磁转矩; ω_T 、 ω_G 为风力机与发电机转子转速; ω_0 为同步转速。

1.3 双馈感应发电机模型与功率解耦控制

双馈感应发电机是在普通绕线式异步感应电机的基础上外加了连接在转子滑环与定子之间的变频器及其控制系统构成的。同步旋转参考坐标系下双馈感应电机的电压方程^[15, 19]为

$$\begin{cases} u_{sd} = d\psi_{sd} / dt - \omega_s \psi_{sq} + R_s i_{sd} \\ u_{sq} = d\psi_{sq} / dt + \omega_s \psi_{sd} + R_s i_{sq} \\ u_{rd} = d\psi_{rd} / dt - s\omega_s \psi_{rq} + R_r i_{rd} \\ u_{rq} = d\psi_{rq} / dt + s\omega_s \psi_{rd} + R_r i_{rq} \end{cases} \quad (3)$$

磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (4)$$

式中： ω_s 为坐标系旋转角速度，即为同步转速； u 、 i 、 ψ 为绕组的电压、电流及磁链； R 为绕组的电阻； L_s 、 L_r 为定子绕组与转子绕组的自感； L_m 为定、转子绕组之间的互感；下标 s 、 r 分别代表电机的定子与转子；下标 d 、 q 分别代表电机的 d 、 q 绕组； s 为电机的转差率。

在电力系统的稳定性研究中，往往都忽略了网络的电磁暂态过程，因此DFIG定子电磁暂态过程也可以忽略，而定子电阻上的压降远远小于定子的端电压，因此定子电阻上的压降也可忽略。为了实现双馈电机有功、无功的解耦控制，并考虑到在仿真软件中实现的方便性，本文采用定子电压定向的转子电流控制方法，将同步旋转的参考坐标系 d 轴与定子电压矢量方向重合，于是有 $u_{sd}=U_s$ ， $u_{sq}=0$ 。在采取上述可行的假设条件下，双馈电机的定子有功、无功可以表示为

$$\begin{cases} P_s = -3U_s L_m i_{rd} / 2L_s \\ Q_s = 3(U_s^2 / \omega_s L_s + U_s L_m i_{rq} / L_s) / 2 \end{cases} \quad (5)$$

其中，转子绕组的有功电流分量 i_{rd} 可实现对定子绕

组有功功率 P_s 的控制，转子绕组无功电流分量 i_{rq} 可控制定子绕组的无功功率 Q_s ； i_{rd} 、 i_{rq} 为转子电流在以定子电压定向的同步旋转坐标系 d 轴、 q 轴上的分量，它们之间不存在耦合关系，从而实现了对定子绕组有功功率 P_s 与无功功率 Q_s 的解耦控制。

控制转子电流是通过间接控制变频器加在转子上的外加电压来实现的，经推导可得转子外加电压控制转子电流的控制方程为

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r di_{rd} / dt - s\omega_s \sigma L_r i_{rq} + sL_m U_s / L_s \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r di_{rq} / dt + s\omega_s \sigma L_r i_{rd} \end{cases} \quad (6)$$

其中 $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r$ 。在定子电压定向坐标系下，转子有功、无功电流分量是完全解耦的，但相应的控制电压矢量没有完全解耦，若用 u_{rd} 控制 i_{rd} ，用 u_{rq} 控制 i_{rq} ，需分别增加前馈输入 $-s\omega_s \sigma L_r i_{rq} + sL_m U_s / L_s$ 与 $s\omega_s \sigma L_r i_{rd}$ ，便可以实现电压的解耦控制。

2 变速风电机组控制模型及暂态电压控制

2.1 变速风电机组综合控制模型

双馈变速风电机组综合控制系统如图 1 所示，包含了两个紧密联系的控制子系统：双馈感应发电机控制与风力机控制。双馈感应发电机控制系统用于独立控制发电机发出的有功、无功功率；包含了两个控制通道：一个用于转子侧变频器控制，一个用于电网侧变频器控制。风力机的控制包括两个控制器：转速控制器与桨距角控制器。转速控制器提

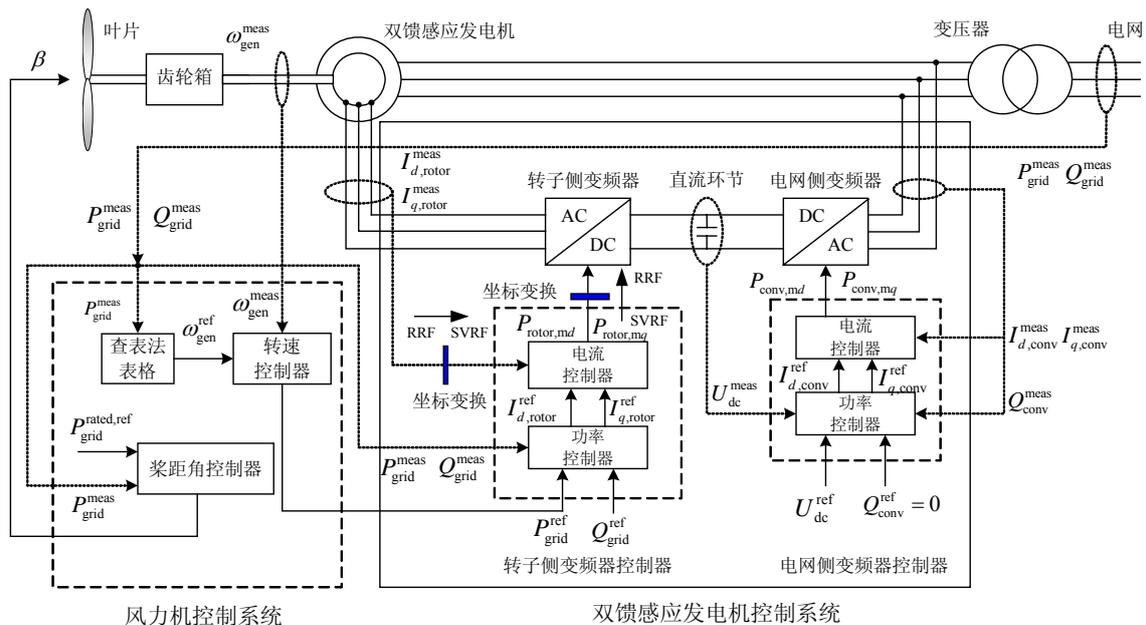


图 1 基于双馈感应电机的变速风电机组综合控制系统示意图

Fig. 1 Overall control system scheme of variable speed wind turbines with DFIG

供用于控制电网点功率的变频器有功功率参考值 $P_{\text{grid}}^{\text{ref}}$ 给双馈电机转子侧变频器的功率控制器；桨距角控制器用于风速超过额定风速、风电机组有功功率超过其额定功率时，增大桨距角以限制风电机组有功功率^[20-21]，而正常工作状态下桨距角保持 0° 。对于变频器的无功控制，转子侧变频器的 $Q_{\text{grid}}^{\text{ref}}$ 根据稳态运行时对并网点无功功率交换程度的要求设定为一个不变值；电网侧变频器的 $Q_{\text{conv}}^{\text{ref}}$ 设定为 0，保持正常工作时转子与电网之间不交换无功。

可以看出，在电网发生短路故障需要风电机组提供无功电压支持时，变频器按照常规的无功控制参考值不可能实现风电机组动态发出无功功率支撑电网电压的功能；而常规的桨距角控制对于由故障引起的风电机组超速也不会产生响应。因此，本文提出了变速风电机组转子侧变频器暂态电压控制方案与参与故障后暂态过程控制的桨距角控制方案，以改善双馈风电机组的暂态电压稳定性，实现变速风电机组的低电压穿越功能。

2.2 转子侧变频器暂态电压控制模型

本文通过双馈电机转子侧变频器控制双馈电机，在电网发生故障电压跌落过程中以及故障后的电压恢复过程中发出无功功率参与系统的暂态电压控制，以保证发电机出口机端电压(或是并网点电压)能在故障后快速恢复并保持在故障前的值。其暂态电压控制框图如图 2 所示。

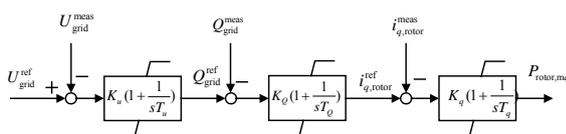


图 2 转子侧变频器暂态电压控制

Fig. 2 Control diagram of rotor side converter with transient voltage control capability

转子侧变频器暂态电压控制器根据给定的电压参考值 $U_{\text{grid}}^{\text{ref}}$ 与故障过程中实际测得的电压值比较，其误差信号经过 PI 控制器，确定双馈电机定子需要发出无功的参考值 $Q_{\text{grid}}^{\text{ref}}$ ，再通过内环的电流控制来调整风电机组实际发出无功功率以帮助双馈感应电机在故障后重建机端电压至给定的参考值。

在增加了转子侧变频器暂态电压控制策略后，由于暂态电压控制的作用，转子电流幅值相对于未采用电压控制时有所增加，但对风电机组的稳定运行、对电网的电压快速恢复都起到了显著作用。由于风电机组一般都不会运行在满发状态，此时其电

流会有更大的裕度，一般不会出现转子过电流。随着电力电子设备的发展，变频器的短时间过流能力也将得到提高，此时，转子电流的短时增大将不会损坏变频器，转子侧变频器的暂态电压控制能力将会得到进一步加强。

2.3 故障后稳定控制的桨距角模型

由于故障后机端电压降低，风电机组无法按原有的故障前有功功率运行，机械转矩大于电磁转矩引起风电机组超速，会导致整个风电场内所有风电机组超速保护动作将风电机组切除，因此需通过故障时或故障后降低风电机组机械转矩来阻止风电机组超速，改善其暂态电压稳定性。风电机组机械转矩的降低通过桨距角控制实现，本文采用的参与暂态过程控制的桨距角控制框图如图 3 所示。

因为电压不稳定与感应电机超速密切相关，因此桨距角控制的输入信号误差取为实际发电机转子转速与故障情况下发电机转速的门槛值之差，当电网发生故障，风电机组转速超出其参考门槛值时，桨距角控制开始动作，以降低风能转换效率系数和风力机的机械转矩；同时由于机械转矩降低，发电机的有功功率也降低，可以提供更多的发电机电容量用于发出无功功率支撑电网电压。

按照现有的风电机组桨距控制技术，完全可以实现故障及故障后电压恢复过程中的桨距角快速控制，本文桨距角变化速率限制在每秒 $\pm 5^\circ$ 以内^[21]。

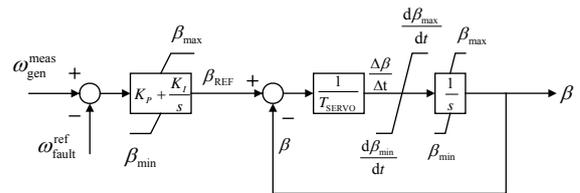


图 3 桨距角控制框图

Fig. 3 Control diagram of pitch control strategy

3 仿真系统及算例分析

3.1 算例系统

算例系统为一个接入风电的实际电力系统，如图 4 所示。研究表明，一个风电场内各台风机之间的电气联系紧密，在系统大扰动故障情况下，各台风机的反应十分类似^[15,22]，因此把风电场看做是一个整体来简化计算过程对于结论并不会产生很大的误差。本文采用一台容量等于整个风电场容量的等值风电机组模型代替整个风电场。

节点 1 为风电场接入电力系统的并网点，风电

场由基于双馈感应发电机的变速风电机组构成。各电厂的同步机组模型中包括了励磁系统、原动机及调速系统模型，同步发电机模型采用计及 E'_d 、 E'_q 、 E''_d 、 E''_q 变化的发电机 6 阶模型；负荷模型采用 50% 恒阻抗、50% 感应电动机模型；研究中电力系统的模型及参数来自实际电网调度的计算模型与参数。系统故障取线路短路最严重情况，即线路三相短路；假定线路三相短路故障在仿真时间 $t=1s$ 时刻发生，故障发生后 0.1s 线路保护动作切除故障线路，不考虑线路重合闸。

本文采用的风电机组为额定功率 1.5MW 的双馈变速风电机组，定子出口额定电压为 690V，电机参数为： $r_s=0.004pu$ ， $x_s=0.1pu$ ， $r_r=0.01pu$ ， $x_r=0.1pu$ ， $x_m=3.5pu$ 。风电机组的惯量为： $H_T=4.02s$ ， $H_G=1.4s$ ，轴系的刚度系数 $K_s=80.27(N \cdot m)/rad$ 。

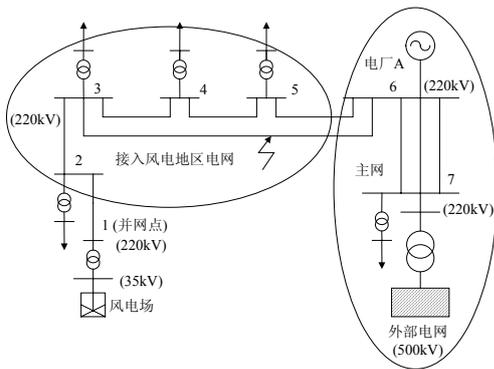


图 4 研究系统地理位置主接线示意图

Fig. 4 Single line diagram of the studied power system

3.2 算例分析

风电场的装机容量为 300MW，下面各种算例情况下风电场都处在额定运行方式，且为了分析风电机组故障后特性，不考虑风电机组的保护。

(1) 算例 1。不采用转子侧变频器暂态电压控制与桨距角控制，线路 3-6 发生三相短路故障。仿真结果如图 5 所示。在风电机组不采用任何附加控制时，故障期间机端电压跌落幅度较大(跌落至 0.3pu)，转速 ω_r 呈现增幅振荡的趋势，无法恢复到故障前稳定运行的状态；且由于故障线路在三相短路故障时切除，导致整个地区电网电压水平过低，整个风电场故障后两级升压变压器消耗的无功大于正常运行状况下消耗的无功，而由于所有风电机组发出的无功功率不会发生变化，因此整个风电场无法保证故障后在并网点与电网的无功交换为 0，而是需要吸收部分无功功率，因此本例中故障后整个风电场吸收的无功功率为 18Mvar。风电场的电磁

有功功率无法按额定送出，因此风电机组的不平衡转矩导致其不断加速；若不采取任何措施，风电机组将会一直加速，最终引起机端电压及地区电网的电压崩溃；若考虑到风电机组的低电压保护或超速保护动作，则整个风电场会在故障后切除，其 LVRT 功能无法实现。

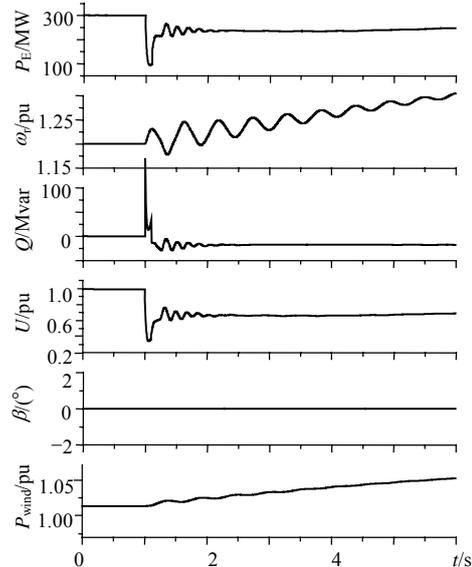


图 5 风电场不采用暂态电压控制方案故障后特性
Fig. 5 Wind farm post-fault performance without transient voltage control strategy

(2) 算例 2。仅采用桨距角控制，线路 3-6 发生三相短路故障。仿真结果如图 6 所示。当变速风电机组仅采用桨距角控制方案时，故障期间机端电压跌落幅度仍然较大(跌落至 0.3pu)，但是风电机组

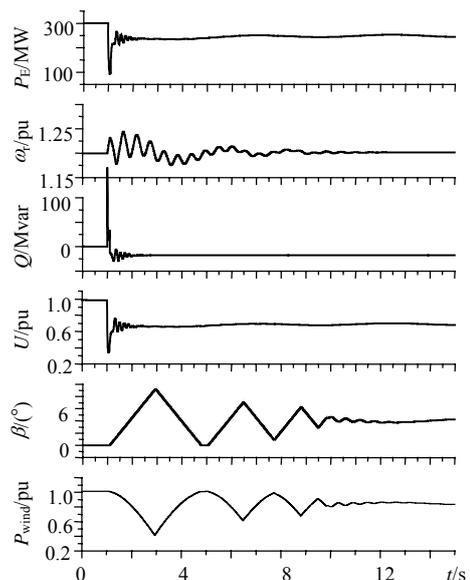


图 6 风电场仅采用桨距角控制方案故障后特性
Fig. 6 Wind farm post-fault performance only with pitch control

经过连续的桨距控制后,其转速能够保证恢复到故障前的稳定运行转速;风电机组桨距角最终保持在 4° 以部分降低风电机组出力使之与风电机组降低的电磁功率平衡;但是由于故障线路切除引起的地区电网电压降低的问题靠桨距角控制仍无法解决,地区电网电压及机端电压水平很低,会引起电网上其他的设备低电压保护、低压减载保护动作。仅靠风电机组的桨距控制,整个电网的安全及可靠性仍无法保证。但是若考虑跳闸线路的重合闸,则若故障线路切除 1s 后重合成功,风电场及电网都可以恢复正常运行,地区电网电压也能恢复正常水平。因此,在特定条件下(故障线路重合成功),依靠桨距角控制能够实现风电场的 LVRT,电网的安全稳定也可以保证。

(3) 算例 3。采用转子变频器暂态电压控制结合桨距角控制,线路 3-6 发生三相短路故障。仿真结果如图 7 所示。当采用风电机组转子侧变频器暂态电压控制及桨距角控制时,风电机组在故障过程中及故障后都能够发出无功功率支撑电网电压,故障期间机端电压跌落幅度变小(仅跌落至 0.7pu),其暂态电压支撑的作用非常明显。虽然故障线路切除导致电网结构变弱,但电网电压及风电机组机端电压在变速风电机组动态无功支持下能够恢复到故障发生前的值,风电机组转速也能够保持稳定;同时注意到,由于动态的无功控制使桨距角控制只在故障的暂态过程中发挥了少许作用,故障清除后桨距角控制恢复到稳定运行状态。风电机组的机械功率与输出电磁有功功率在故障后不会受到损失,整个风电场仍然能在自身的无功支持下维持故障前的额定运行状态,完全实现了 LVRT 的能力,且对于整个地区电网的电压稳定改善也带来很大好处。

需说明的是,电网发生严重故障期间,双馈电机转子绕组可能会产生过流现象,转子过流的程度与电网故障情况、故障地点离风电机组的远近有密切关系,当风电场出口发生严重短路故障时,转子电流一般都会超出 2 倍转子额定电流,变频器的 crow-bar 保护便会动作将转子绕组短接,转子侧变频器同时闭锁,此时双馈风电机组将失去控制能力,转子变频器的暂态电压控制策略也无法起到作用,整个双馈感应电机按普通异步发电机来运行;但是为了尽快恢复双馈电机的控制能力,crow-bar 保护的投入时间会尽可能的短,故障发生几个周波后转子暂态电流降低到正常范围内时,crow-bar 保

护便会退出,变频器重新启动,风电机组的暂态电压控制能力可以恢复,重新对风电场电压进行控制。如文中短路故障没有发生在风电场出口,风电机组转子过流不会超出过流保护的定值,crow-bar 保护并不动作,此时无论是故障过程中还是故障后转子变频器都可以进行暂态电压控制。

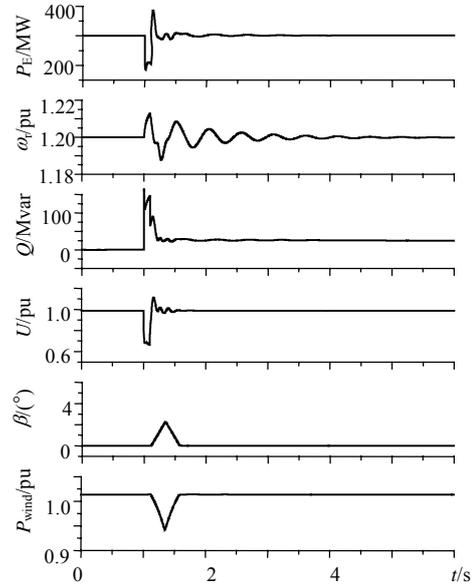


图 7 风电场采用转子侧变频器暂态电压控制与桨距角控制方案故障后特性

Fig. 7 Wind farm post-fault performance with rotor-side converter transient voltage control and pitch control

4 结论

对改善基于双馈感应电机的并网风电场暂态电压稳定性问题进行了研究,提出了变速风电机组转子侧变频器暂态电压控制方案与参与暂态过程控制的桨距角控制方案,以改善双馈风电机组的暂态电压稳定性。在 DIgSILENT/PowerFactory 中建立具有暂态电压支持能力的变速风电机组转子侧变频器暂态电压控制模型及桨距角控制模型,通过含风电场的电力系统仿真计算验证了模型的有效性及其对风电场及电网的暂态电压稳定性的贡献。研究表明,当电网侧发生三相短路故障时,风电机组变频器暂态电压控制能够有效地控制风电机组提供无功功率支持电网电压;桨距角控制能够有效地降低变速风电机组机械转矩,避免出现风电机组转矩不平衡引起的发电机超速及电压失稳;采用转子侧变频器暂态电压控制及用于故障后稳定控制的桨距角控制能够改善双馈感应发电机并网风电场的暂态电压稳定性,确保风电机组低电压穿越(LVRT)功能的实现及电网安全稳定。

致 谢

本文的研究工作得到了中国—德国技术合作项目“风电研究与培训”的软件支持及风电机组建模方面的技术支持, 在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] Datta R, Ranganathan V T. A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2003, 18(1): 163-168.
- [2] Zinger D S, Muljadi E. Annualized wind energy improvement using variable speeds[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1997, 33(6): 1444-1447.
- [3] Lei Y Z, Mullane A, Lightbody G, et al. Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(1): 257-264.
- [4] Pena R, Clare J C, Asher G M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable speed wind-energy generation[J]. IEE Proceedings on Electric Power Applications, 1996, 143(3): 231-241.
- [5] Piwko R, Miller N, Sanchez-Gasca J, et al. Integrating large wind farms into weak power grids with long transmission lines [C]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, Dalian, China, 2005.
- [6] 雷亚洲, Gordon L. 国外风力发电导则及动态模型简介[J]. 电网技术, 2005, 25(12): 27-32.
Lei Yazhou, Gordon L. An introduction on wind power grid code and dynamic simulation[J]. Power System Technology, 2005, 25(12): 27-32(in Chinese)
- [7] 林成武, 王凤翔, 姚兴佳. 变速恒频双馈风力发电机励磁控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 122-125.
Lin Chengwu, Wang Fengxiang, Yao Xingjia. Study on excitation control of VSCF doubly fed wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 122-125(in Chinese).
- [8] 苑国锋, 柴建云, 李永东. 变速恒频风力发电机组励磁变频器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 90-94.
Yuan Guofeng, Chai Jianyun, Li Yongdong. Study on excitation converter of variable speed constant frequency wind generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 90-94(in Chinese).
- [9] 卞松江, 吕晓美, 相会杰, 等. 交流励磁变速恒频风力发电系统控制策略的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 57-62.
Bian Songjiang, Liu Xiaomei, Xiang Huijie, et al. Modeling and simulation of AC excited vsfc in wind power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 90-94(in Chinese).
- [10] 李晶, 王伟胜, 宋家骅. 变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 14-17.
Li Jing, Wang Weisheng, Song Jiahua. Modelling and dynamic simulation of variable speed wind turbine[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 14-17(in Chinese).
- [11] 向大为, 杨顺昌, 冉立. 电网对称故障时双馈感应发电机不脱网运行的励磁控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 164-170.
Xiang Dawei, Yang Shunchang, Ran Li. Ride-through control strategy of a doubly fed induction generator for symmetrical grid fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 164-170(in Chinese).
- [12] 向大为, 杨顺昌, 冉立. 电网对称故障时双馈感应发电机不脱网运行的系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 130-135.
Xiang Dawei, Yang Shunchang, Ran Li. System simulation of a doubly fed induction generator ride-through control for symmetrical grid fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 130-135(in Chinese).
- [13] 申洪, 梁军, 戴慧珠. 基于电力系统暂态稳定分析的风电场穿透功率极限计算[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 8-11.
Shen Hong, Liang Jun, Dai Huizhu. Calculation of wind farm penetration based on power system transient stability analysis [J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 8-11.
- [14] 吴学光, 张学成, 印永华, 等. 异步风力发电系统动态稳定性分析的数学模型及其应用[J]. 电网技术, 1998, 22(6): 68-72.
Wu Xueguang, Zhang Xuecheng, Yin Yonghua, et al. Application of models of wind turbine induction generators to wind power dynamic stability analysis[J]. Power System Technology, 1988, 22(6): 68-72(in Chinese).
- [15] Akhmatov V. Analysis of dynamic behavior of electric power systems with large amount of wind power[D]. Copenhagen: Technical University of Denmark, 2003.
- [16] Pöller M, Achilles S, Moodley G. Variable-speed wind-generator models for power system stability analysis[C]. The world wind Energy Conference and renewable Energy Exhibition, Cape Town, South Africa, 2003.
- [17] Pöller M. Doubly-fed induction machine models for stability assessment of wind farms[C]. IEEE-Power-Tech Conference, Bologna, Italy, 2003.
- [18] 李东东, 陈陈. 风力发电机组动态模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 115-119.
Li Dongdong, Chen Chen. A study on dynamic model of wind turbine generators sets[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 115-119(in Chinese).
- [19] Kunder P. Power system stability and control[M]. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [20] Hansen A D, Jauch C, Sorensen P. Dynamic wind turbine models in power system simulation tool digsilent[R]. Copenhagen Denmark: Risø National Laboratory, Risø Denmark. Tech. Rep Risø-R-400(EN), 2003.
- [21] Sun T, Chen Z, Blaabjerg F. Voltage recovery of grid-connected wind turbines after a short-circuit fault[C]. Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Virginia, USA, 2003.
- [22] Slootweg J G, Kling W L. Aggregated modelling of wind parks in power system dynamics simulations[C]. Power Tech Conference of IEEE, Bologna, Italy, 2003.

收稿日期: 2007-02-06。

作者简介:

迟永宁(1973—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为风电并网对电力系统影响、电力系统稳定性分析, chiyn@epri.ac.cn;

王伟胜(1968—), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事电力系统分析与风力发电领域的科研与教学工作;

戴慧珠(1939—), 女, 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统分析与风力发电等领域的科研与教学工作。

(编辑 王剑乔)