

# 含DFIG风电场的电网稳定性分析

随着风电场容量在系统中所占比例的增加,新增大容量风力发电机组多数为双馈型风力发电机组。双馈风机的暂态特性给电网的潮流、功角带来影响,因此研究含双馈风机的电网稳定性具有重要意义。基于DFIG风电机组以及系统的动态模型,研究了风电机组接入后出力变化和风速变化对系统产生的影响,然后根据风电机组接入系统后的情况,研究了风电场不同接入容量和发生不同故障情况下对电网稳定性的影响。仿真结果表明,风电场接入不会影响电网小干扰稳定性,且在系统故障期间可为系统提供一定的无功支撑,改善电网暂态稳定性。

顾威<sup>1</sup> 任祖怡<sup>2</sup> 文贤旭<sup>1</sup> 倪建军<sup>2</sup> 张礼波<sup>3</sup>/1.贵州电网有限责任公司电力科学研究院 2.南京南瑞继保电气有限公司 3.贵州电网有限责任公司六盘水供电局

## 0 引言

随着现代工业的飞速发展和化石能源的日趋枯竭,能源和环境问题日益严峻,风电作为一种可再生的绿色能源,得到全世界的广泛重视和快速发展。风电并入电网要有无功的支撑,与异步感应风电机组在运行时吸收无功功率相比,双馈异步风电机组(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)发出有功的同时既可吸收无功也可发出无功,基于双馈感应电机技术的变速风电机组已成为风电场的主流机型,新增的大容量风力发电机组90%以上都是双馈型风力发电机组<sup>[1]</sup>。双馈风机的暂态特性明显区别于传统同步机组,同时,大型风电场的并网改变了电网中的潮流分布,从而影响常规机组的同步转矩<sup>[2]</sup>。因此,随着风电场容量在系统中所占比例的增加,

有必要探究含大量双馈风机的电网稳定性。目前,国内外专家对此问题展开了一系列研究。文献[3]从系统电压稳定性角度,通过建立含DFIG的动态系统模型,运用分岔理论分析了对系统电压稳定的影响,但是没有具体涉及不同故障下的电网稳定性分析;文献[4]对双馈风力发电机功角特性进行定义,对双馈风电机组接入后单端系统的功角稳定性进行理论分析和仿真,但也未针对电力系统处于暂态过程中的稳定性进行分析;文献[5]研究了不同风电场接入容量和系统故障情况对系统暂态稳定的影响,但没有涉及风电场对电网的影响研究。

针对以上问题,本文首先研究基于DFIG的风电机组的数学模型,并在此基础上研究含风电场的电力系统动态模型;然后从电网潮流无功变化和风速对风电场的影响两个方面,研究双馈风力发电机组接入系统后对电网潮流和功角的影响;最后针对风电机组接入系统以及系统发生并网点三相短路和线路故障这两种情况,对电网的稳定性进行仿真计算。针对实际风电场研究其接入后对电网稳定性的影响,不仅为风电场安全稳定运行研究奠定了一定的基础,而且为相关调度部门进行风电场运行方式的调整提供了一定的参考。

## 1 基于DFIG的风电机组的数学模型

### 1.1 DFIG的特性

DFIG兼有同步电机和异步电机的特



顾威/工程师

### 关键词/Keywords

双馈电机·  
风力发电·  
电网稳定性·  
动态模型·

国家科技支撑计划资助项目(2013BAA02B02)。

点, 转速可以调整, 类似于异步电机, 与同步电机运行特性则更加相似。DFIG的定子绕组直接与电网相连, 转子通过一组AC-DC-AC功率电子变换器和电网连接<sup>[6]</sup>。由于具有独立的交流转子励磁绕组, 因此DFIG的无功出力是可调的。另外, 通过转子AC-DC-AC变频器的控制交流励磁电流使得DFIG相对同步电机不仅转子励磁电流的幅值、频率和相位均可调<sup>[6]</sup>, 而且使DFIG的有功、无功均可调, 控制相对更灵活。

## 1.2 DFIG的动态模型

按惯例, 定子侧取发电机惯例, 转子侧取电动机惯例, 在两相旋转dq坐标系下, DFIG动态模型如下。

### (1) 电压方程

定子绕组电压方程为

$$\begin{aligned} u_{sd} &= -R_s i_{sd} - p\psi_{sd} + \omega_1 \psi_{sq} \\ u_{sq} &= -R_s i_{sq} - p\psi_{sq} - \omega_1 \psi_{sd} \end{aligned} \quad (1)$$

转子绕组电压方程为

$$\begin{aligned} u_{rd} &= R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - \omega_s \psi_{rq} \\ u_{rq} &= R_r i_{rq} + p\psi_{rq} + \omega_s \psi_{rd} \end{aligned} \quad (2)$$

### (2) 磁链方程

定子磁链方程为

$$\begin{aligned} \psi_{sd} &= L_s i_{sd} - L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} &= L_s i_{sq} - L_m i_{rq} \end{aligned} \quad (3)$$

转子磁链方程为

$$\begin{aligned} \psi_{rd} &= L_r i_{rd} - L_m i_{sd} \\ \psi_{rq} &= L_r i_{rq} - L_m i_{sq} \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $L_m$ 为定转子绕组等效互感;  $L_s$ 为定子绕组等效自感;  $L_r$ 为转子绕组等效自感。

考虑磁链和电压后将式(3)、式(4)代入式(1)、式(2)可以得到电压和电流的关系为

$$\begin{pmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{dr} \\ u_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_s - L_s p & \omega_1 L_s & L_m p & -\omega_1 L_m \\ -\omega_1 L_s & -R_s - L_s p & \omega_1 L_m & L_m p \\ -L_m p & \omega_s L_m & R_r + L_r p & -\omega_s L_r \\ -\omega_s L_m & -L_m p & \omega_s L_r & R_r + L_r p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{pmatrix} \quad (5)$$

### (3) 转矩方程

dq坐标系下的转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} n_p L_m (i_{ds} i_{qr} - i_{qs} i_{dr}) \quad (6)$$

式中,  $n_p$ 为双馈异步电机极对数。

### (4) 运动方程

$$T_1 - T_e = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega}{dt} \quad (7)$$

式中,  $T_1$ 为风机输入转矩;  $T_e$ 为电磁转矩;  $J$ 为转动惯量;  $\omega$ 为转子电角速度。

DFIG在两相旋转dq坐标系下的数学模型由以上4个方程构成。

## 2 系统动态模型

风力发电机组并网时最常用的接口即为异步电机。三相异步发电机中, 定子绕组与三相对称电源相连接, 转子绕组有时内部短接, 有时经过滑环与外部的无源电路相连接。

异步发电机的定子采用发电机惯例, 而转子采用电动机惯例, 在分析过程中, 令异步电动机的

差  $s = \frac{\omega_0 - \omega_s}{\omega_0}$ , 其中,  $\omega_0$ 为同步转速,  $\omega_s$ 为转子转速。

### (1) 异步发电机的电磁暂态方程

$$\begin{cases} \frac{dE'_d}{dt} = \frac{1}{T'_0} [-E'_d + (x - x') i_q - 2\pi f_0 s T'_0 E'_q] \\ \frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_0} [-E'_q - (x - x') i_d + 2\pi f_0 s T'_0 E'_d] \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $s$ 为异步发电机的转差;  $x' = x_1 + x_2 x_m / (x_2 + x_m)$ 为发电机的暂态电抗;  $x_1$ 为发电机的定子漏抗,  $x_m$ 为发电机的励磁电抗,  $x_2$ 为发电机的转子漏抗;  $T'_0 = (x_2 + x_m) / (2\pi f_0 r)$ 为定子开路时转子回路的时间常数;  $f_0$ 为额定频率。

### (2) 异步发电机定子电压方程

$$\begin{cases} V_d = -r_1 I_d + E'_d + x' I_q \\ V_q = -r_1 I_q + E'_q - x' I_d \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $V_d$ 、 $V_q$ 分别为机端电压的d轴、q轴分量;  $I_d$ 、 $I_q$ 分别为定子电流的d轴、q轴分量;  $x'$ 为暂态电抗;  $E'_d$ 、 $E'_q$ 分别为d轴、q轴的暂态电势;  $r_1$ 为定子绕组。

### (3) 异步发电机转子运动方程

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_i}(P_m - P_t) \quad (10)$$

式中,  $T_J$  为异步发电机的转子惯性时间常数;  $P_t$  为机械转矩;  $P_e$  为电磁转矩 ( $P_e = E_d' I_d + E_q' I_q$ )。

国外的有些文献经常用 $H$ 来表示发电机转子的机械惯性,这时只需要将式(10)中的 $T_J$ 换成 $2H$ 即可继续进行分析。

同样的，为了进行系统稳定性分析，将上述非线性方程在其稳态运行点处进行线性化，得出系统线性化方程，从而可以方便计算系统的状态矩阵，得到状态矩阵的特征值，判断系统稳定情况。线性化方程为

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\Delta E'_d}{dt} &= \frac{1}{T'_0} [-\Delta E'_d + (x - x')\Delta i_q - 2\pi f'_0 T'_0 (s_0 \Delta E'_q + \Delta s E'_{q0})] \\ \frac{d\Delta E'_q}{dt} &= \frac{1}{T'_0} [-\Delta E'_q - (x - x')\Delta i_d + 2\pi f'_0 T'_0 (s_0 \Delta E'_d + \Delta s E'_{d0})] \\ \frac{d\Delta s}{dt} &= \frac{1}{T_j} [E'_{d0} \Delta I_d + E'_{q0} \Delta I_q + \Delta E'_d I_{d0} + \Delta E'_q I_{q0}] \end{aligned} \right. \quad (11)$$

$$\begin{cases} \Delta V_d = -r_1 I_d + \Delta E'_d + x' \Delta I_q \\ \Delta V_q = -r_1 I_q + \Delta E'_q - x' \Delta I_d \end{cases} \quad (12)$$

### 3 基于DFIG的风电场对电网的影响分析及仿真

### 3.1 风电场模型

研究对象选择某120 MW风电场, 风电场全部采用GE1.5sle型双馈异步风力发电机, 总装机容量为120 MW。计算时电网采用夏季高峰负荷典型数据, 调用电量为5 000万kW, 开机方式为全开机。电网架构如图1所示, 其中1~24为变电站节点编号, ①~⑤为发电厂编号, I、II为接入风电场。

### 3.2 风电场接入对电网无功电压的影响

该地区120 MW风电场接入后,地区电网潮流会重新分布,导致周边关键通道3-4-5线路以及3-15线路可能出现超稳定限额的情况,因此需要研究风电场周边电网潮流分布情况。

基于以上数据进行潮流计算, 风电场出力变

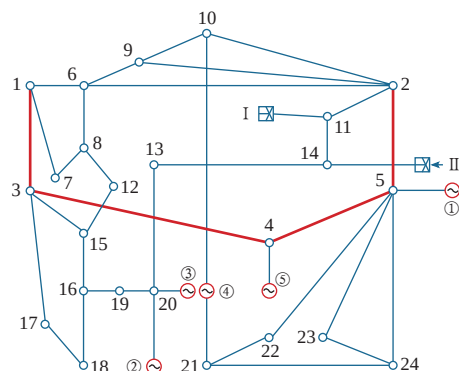


图1 含DFIG风电场的电网结构

化对邻近线路功率因数影响如图2所示。

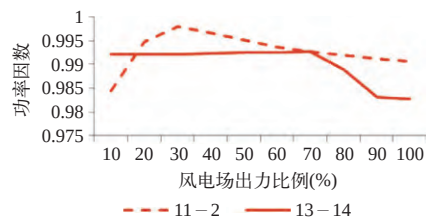


图2 邻近线路功率因数变化情况

由图2可见,有功出力增加的过程中,为了满足风电场电压恒定的要求,风电场无功出力也相应增加,在有功出力小于30%时,由于无功出力不大,有功出力的增加占主导地位,因此周边11-2线路和13-14线路的功率因数随着风电场无功出力增加。随着有功出力不断增大,无功出力迅速增加,并且无功增加速度超过了有功的变化,因此导致周边线路功率因数开始下降。

就目前网络拓扑、电源分布和负荷水平来看，风电场对周边电网电压水平无明显影响，系统电压和频率稳定性能够满足要求。若风电场容量进一步增加，则有必要加强输电系统网络结构。对于风电场出力过大后末端电压偏高的情况，应及时调整有载调压变压器分接头位置，以保证电压运行在合理水平。

### 3.3 风速变化对风电场的影响

为了检验风速变化产生的扰动下风电场的动态稳定性和风速对周边地区的影响,在典型阵风下进行小扰动稳定仿真。典型阵风的风速变化如图3所示。阵风起始时间为1 s,结束时间为6 s,阵

风变化的峰值为13 m/s,在典型阵风影响下,风电机组有功功率和发电机转子角速度变化情况如图4所示。

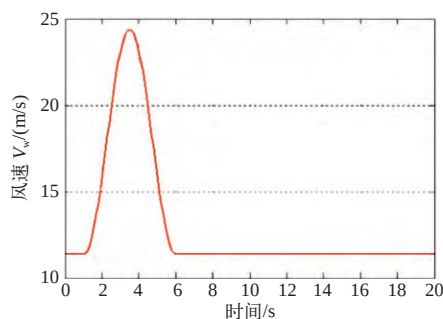


图3 典型风速

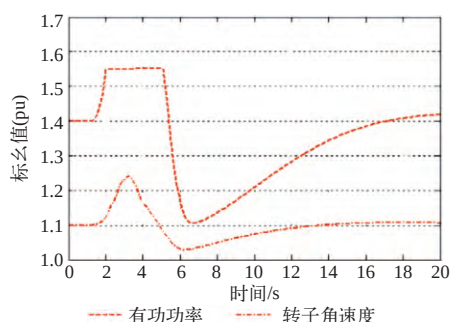


图4 风电机组有功出力变化曲线

由图4可见,受风速变化影响,风电机组的有功出力和转速迅速增加,但是,在额定风速为11.8 m/s以下,风力机桨距角基本保持在 $0^\circ$ 附近,这期间风能利用系数 $C_p(\lambda, \beta)$ 保持最大。随着典型阵风扰动继续增大,超过了GE1.5型风机的额定风速,即11.8 m/s,桨距角控制启动,桨距角 $\beta$ 由额定风速下的 $0^\circ$ 开始增大,桨距角 $\beta$ 的增大减小了风能利用系数 $C_p(\lambda, \beta)$ ,DFIG进入恒功率运行,发电机转速随着风速增大也达到最大,有功出力在2.1 s达到最高的1.52(pu)并保持不变,直到风速降至额定风速以下。典型风结束后,桨距角控制起作用使有功功率回落到正常运行水平1.45(pu),扰动过程中桨距角变化曲线如图5所示。

可见,桨距角的变化过程满足功率控制的要求,扰动过程中风电机组无功出力和机端电压变化情况如图6所示。

在扰动过程中机端电压基本保持在额定值1(pu)附近,最高为1.005(pu),最低为0.999 4(pu),

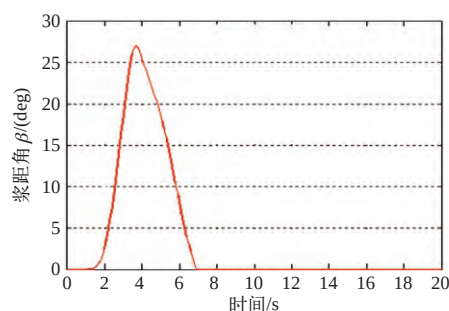


图5 桨距角变化曲线

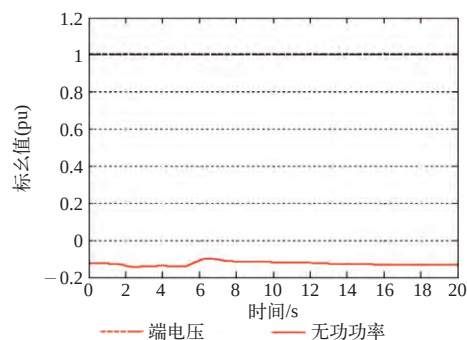


图6 风电机组无功出力变化曲线

前后最大波动0.000 9(pu),可见恒电压控制下,风电机组的机端电压能够保持恒定。在扰动较大的2~5 s期间,机组吸收无功减小,维持了机端电压恒定,相当于给外部电网提供无功支持,导致周边地区母线电压上升,缓解了周边发电厂③以及发电厂④无功紧张的局面,但是在扰动期间需要关注母线电压是否越限,电压过高时要考虑切机减负荷等操作。

## 4 含DFIG的电网稳定性分析

研究对象选择仍为该120 MW风电场,风电场全部采用GE1.5sle型双馈异步风力发电机,总装机容量为120 MW。

### 4.1 风电机组接入时的电网稳定性分析

为研究风电机组接入对电网稳定性的影响,针对图1中的电网架构,分析在系统同一位置接入不同容量的风电机组时,对系统小干扰稳定的影响。在风电场接入的11节点,不断增加风电机组的有功输出(如5 MW, 10 MW),计算不同情况下系统的特征值,分析不同容量的风电机组对系统小干扰稳定的影响。计算所得的系统特征值如

下表所示。

表 风电机组容量不同时系统的特征值

| 接入5 MW              | 接入10 MW             |
|---------------------|---------------------|
| $-0.5896 - j0.4435$ | $-0.5987 - j0.4704$ |
| $-0.5896 + j0.4435$ | $-0.5907 + j0.4554$ |
| $-1.4211 - j8.7804$ | $-1.4324 - j8.8012$ |
| $-1.4211 + j8.7804$ | $-1.4298 + j8.7905$ |
| $-0.7356 - j6.8106$ | $-0.7421 - j6.8710$ |
| $-0.7356 + j6.8106$ | $-0.7405 + j6.8266$ |
| $-0.6507 - j7.1423$ | $-0.6598 - j7.1512$ |
| $-0.5566 + j8.2343$ | $-0.5688 + j8.5523$ |
| $-0.4275 - j0.4508$ | $-0.4375 - j0.4628$ |
| $-1.2264 + j8.6162$ | $-1.2377 + j8.6945$ |
| $-0.4136 + j0.4543$ | $-0.4543 + j0.4667$ |
| $-0.6013 - j6.7904$ | $-0.6505 - j6.8234$ |
| $-0.5498 - j6.8336$ | $-0.5579 - j6.8453$ |
| $-0.5498 + j6.8336$ | $-0.5515 + j6.8432$ |
| $-1.0413 - j8.597$  | $-1.0499 - j8.612$  |
| $-1.0413 + j8.597$  | $-1.0520 + j8.665$  |
| $-0.4248 - j0.4962$ | $-0.4338 - j0.5145$ |
| $-0.4248 + j0.4962$ | $-0.4401 + j0.5043$ |
| $-0.1567 - j0.2891$ | $-0.1624 - j0.2905$ |
| $-0.6782 + j3.4508$ | $-0.6886 + j3.545$  |
| $-0.5818 - j6.8189$ | $-0.5907 - j6.8245$ |
| $-0.4248 + j0.4962$ | $-0.4568 + j0.5346$ |
| $-0.5674 + j6.934$  | $-0.5897 + j7.122$  |
| $-1.1829 + j8.6032$ | $-1.1902 + j8.6775$ |

从表中数据可以看出,在接入5 MW和10 MW的风电机组时,系统所有的特征值均有负的实部,即系统处于小干扰稳定状态。可见风电机组容量的增加不会影响系统的小干扰稳定,并且在一定程度上能改善系统的动态特性。

类似地,求出系统的特征值的阻尼比,进一步对比分析不同容量的风电机组对系统稳定性的影响。可以看出,接入风电机组容量越大,阻尼比越大。由此可见,风电机组并网渗透率越高,其对系统小干扰稳定的影响越小,越有利于系统稳定。

## 4.2 系统故障时的电网稳定性分析

### (1) 并网点三相短路故障分析

风电场并网点11节点母线,在3 s发生瞬时三相接地故障,故障持续时间为0.1 s。在故障过

程中,风电机组有功功率和发电机转子角速度的变化情况如图7所示。从图7中可以看出,在故障瞬间,由于桨距角控制起作用,输入机械功率降低,风力发电机有功出力由额定值迅速降为0,待故障切除后恢复正常水平,风机转子角速度并没有超速失稳,基本维持在额定1.2(pu)左右,风电机组在外部电网故障下能保持暂态稳定。

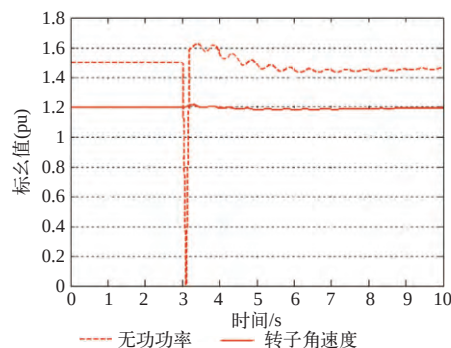


图7 并网点故障期间风电机组有功出力变化曲线

在故障期间风电机组无功出力和机端电压变化情况如图8所示。可见,在故障瞬间,机组由故障前吸收0.18(pu)的无功功率增加到0.88(pu),故障切除后渐渐恢复到故障前水平,这个过程中风电机组的机端电压能够稳定在故障前水平。故障瞬间风电机组吸收电网无功减少,有利于电网电压稳定,但是,切除并网点故障过程中,最大吸收无功功率达到0.88(pu),相比故障前变化了0.62(pu),有一定的电压失稳风险。因此,需要格外关注风电场周边电压变化情况,适当投切无功补偿装置以减少电压失稳的风险。

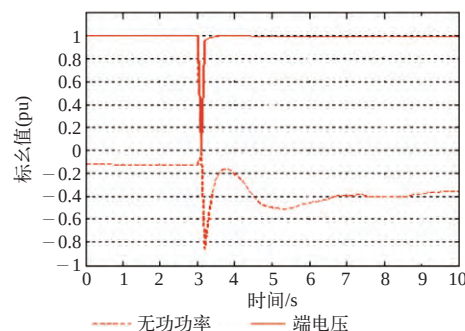


图8 并网点故障期间风电机组无功出力变化曲线

故障对于周边发电厂②和发电厂④的功角影响如图9所示。可见,风电场并网点母线三相瞬时

故障引起周边发电厂功角产生小幅振荡，发电厂④机组最大摇摆 $7^{\circ}$ ，最终能够维持暂态功角稳定性，未造成失稳。

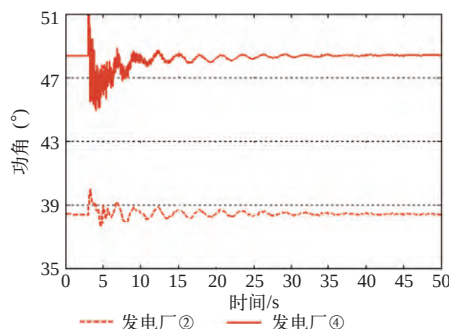


图9 并网点故障期间邻近发电厂功角变化曲线

## (2) 线路故障分析

3-15线路任一回线路发生三相故障，故障后0.1 s保护动作三相开关跳闸，系统可以保持稳定运行，风电机组有功功率和发电机转子角速度的变化曲线如图10所示。与并网点故障不同，在故障瞬间，桨距角控制开始起作用，有功功率降低，风力发电机有功出力虽然迅速下降但没有降到0，机端电压降低导致电磁功率减小，电机转子有小幅加速，但是没有超速失稳，DFIG在外部电网故障下能保持暂态稳定。

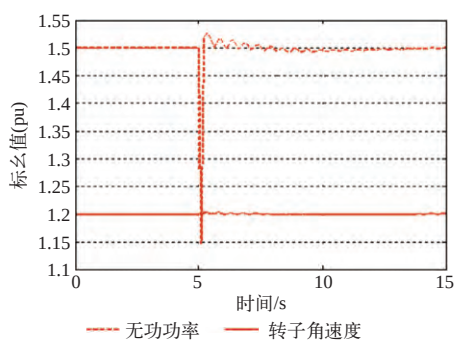


图10 故障期间风电机组有功出力变化曲线

在故障期间风电机组无功出力和机端电压变化情况如图11所示。故障前机组吸收无功约为0.08(pu)，电网故障瞬间，机组发出了大量的无功，最大值达到了0.65(pu)，向周围电网提供无功支撑，缓解了周边电网的电压跌落。故障消失后，风电机组又改为进相运行，吸收过剩的无功，实现了无功电压的平衡，对电网电压稳定起到了积极的作用，最后基本稳定在故障前水平。

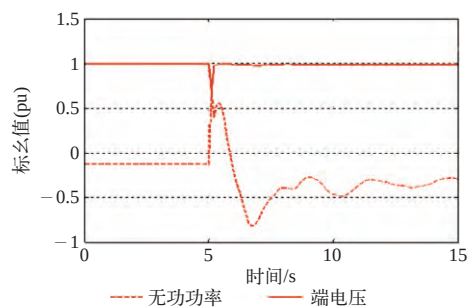


图11 故障期间风电机组无功出力变化曲线

故障对于周边发电厂③和发电厂④功角影响如图12所示。3-4主干线路故障引起周边发电厂功角产生了较小幅度的振荡，发电厂④机组最大摇摆角为 $20^{\circ}$ ，发电厂②机组最大摇摆角为 $18^{\circ}$ ，但是周边发电厂最终能够维持暂态功角稳定性，任一回线路故障不会造成功角失稳。

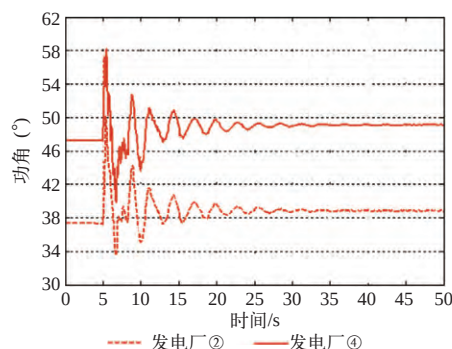


图12 故障期间邻近发电厂功角变化曲线

## 5 结束语

基于双馈型风力发电机组的动态数学模型以及接入异步电机的系统动态模型，分析了风电机组接入和电网故障两种情况下风电机组对电网稳定性的影响。仿真结果表明，风电机组的接入有利于系统小干扰稳定，在一定程度上能改善系统的动态特性；而在外部交流电网故障时，风电机组能够向电网提供一定的无功支撑，改善了电网暂态稳定性，且故障越严重风电机组对电网提供的无功支撑越大。此外，并网点母线故障时无功波动较大需要根据实际电压变化情况配合相应的无功补偿措施。现有规模下风电机组不会造成任一线路故障情况下的过载，未来要考虑并网点线路的增容改造来缓解过负荷问题。

(下转第27页)

- [2] 杜颖, 卢继平, 李青, 等. 基于最小二乘支持向量机的风电场短期风速预测 [J]. 电网技术, 2008, 32 (15): 62-66.
- [3] 范高峰, 王伟胜, 刘纯, 等. 基于人工神经网络的风电功率预测 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (34): 118-123.
- [4] 潘迪夫, 刘辉, 李燕飞. 基于时间序列分析和卡尔曼滤波算法的风电场风速预测优化模型 [J]. 电网技术, 2008, 32 (7): 82-86.
- [5] 张国强, 张伯明. 基于组合预测的风电场风速及风电机功率预测 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (18): 92-95.
- [6] 彭怀午, 刘方锐, 杨晓峰. 基于组合预测方法的风电场短期风速预测 [J]. 太阳能学报, 2011, 32 (4): 543-547.
- [7] 陈宁, 沙倩, 汤奕. 基于交叉熵理论的风电功率组合预测方法 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (4): 29-34.
- [8] Yager R R. Induced aggregation operators [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2003, 137 (1): 59-69.
- [9] 陈华友, 蔡正高. 诱导有序加权平均的组合预测模型及其应用 [J]. 安徽大学学报: 自然科学版, 2005, 29 (1): 1-6.
- [10] 陈华友, 陈启明, 李洪岩. 一类基于OWA算子的组合预测模型及性质 [J]. 运筹与管理, 2006, 15 (6): 34-39.
- [11] Yang X S, Deb S. Cuckoo search via Levy flights [C]. Proceedings of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing, India, IEEE Publications, 2009: 210-214.
- [12] Yang X S, Deb S. Engineering optimisation by cuckoo search [J]. International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation, 2010, 1 (4): 330-343.
- [13] Yoon K J, Kweon I S. Adaptive support-weight approach for correspondence search [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28 (4): 650-656.
- [14] 李煜, 马良. 新型元启发式布谷鸟搜索算法 [J]. 系统工程, 2012, 30 (8): 64-69.
- [15] 柳新妮, 马苗. 布谷鸟搜索算法在多阈值图像分割中的应用 [J]. 计算机工程, 2013, 39 (7): 274-278.

(收稿日期: 2015-04-23) EA

(上接第21页)

## 参考文献

- [1] 石立宝, 戴世强, 徐政. 大规模双馈型风电场并网的系统暂态稳定仿真 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21 (4): 1-7.
- [2] 汤蕾, 沈沉. 大规模风电接入对电力系统暂态稳定性影响机理研究 [J]. 电力科学与技术学报, 2014, 29 (4): 25-33.
- [3] 袁义桃, 康积涛, 吴小刚, 等. 含双馈风电机的电力系统电压稳定性分岔分析 [J]. 中国电力, 2014, 47 (3): 42-47.
- [4] 于强, 孙华东, 汤涌, 等. 双馈风电机组接入对电力系统功角稳定性的影响 [J]. 电网技术, 2013, 37 (12): 3400-3405.
- [5] 于辉, 周成, 刘鲁宁. 基于DFIG的风电接入系统对电力系统暂态稳定性的影响 [J]. 沈阳工程学院学报: 自然科学版, 2009, 5 (4): 305-307.
- [6] 陈坚. 交流电机数学模型及调速系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [7] 廖勇, 杨顺昌. 交流励磁发电机励磁控制 [J]. 中国电机工程学报, 1998, 18 (2): 87-90.
- [8] 章勇高, 龚锦红, 李健. 双馈异步发电机应用于风力发电中的仿真研究 [J]. 华东交通大学学报, 2004, 21 (4): 56-59.
- [9] 郭健. 大规模风电并入电网对电力系统的影响 [J]. 电气自动化, 2010, 32 (1): 47-50.
- [10] 郝元钊, 李培强, 李欣然, 等. 风电机组对电力系统暂态稳定性影响分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24 (2): 41-46.

(收稿日期: 2015-04-23) EA