

# 集成服务环境下风电并网的无功调节

## (一) 无功调节

段 斌, 吴亚联, 周立明

(湘潭大学信息工程学院, 湖南省湘潭市 411105)

**摘要:** 依据风电功率预测和地区系统无功优化运行方案, 计算风电机组电气控制参考值, 通过每台风电机组控制器和变频器调节风电场注入系统的无功功率。提出了集成服务环境下风电场的无功调节策略, 介绍了风电数据采集与监控(SCADA)系统的功率预测过程和参数整定过程。以基于双馈异步发电机的变速恒频风电机组为例, 介绍了风电机组无功调节的实现方案。

**关键词:** 无功调节; 应用集成; 数据采集与监控(SCADA); 风力发电; 双馈异步发电机

**中图分类号:** TM614; TM761

### 0 引言

合理的控制策略不但能保证风电机组最大限度地、安全地捕获风能, 同时也能充分发挥风电机组的无功调节能力, 使风电机组能够参与电网的无功调节, 平衡无功扰动, 提高风电机组接入系统的电压稳定性, 实现全网的优化运行<sup>[1-3]</sup>。文献[4-5]提出一种基于配电网无功优化的变速恒频双馈风电机组控制策略, 结合风速预测与地区系统无功优化运行, 为风电机组中的各台机组整定控制参考值。目前, 国内外一些先进风电机组的功率因数可调<sup>[6-7]</sup>, 但由于风电场的信息系统缺乏与地调能量管理系统(EMS)的集成服务, 使得在大多数风电并网控制策略中将无功功率设定为 0 (即设  $\cos \phi = 1$ ), 只对外提供有功功率<sup>[8]</sup>。而依据风电功率预测和地区系统无功优化运行方案, 计算风电机组电气控制参考值, 通过每台风电机组控制器和变频器调节风电场注入系统的无功功率, 有利于解决风电场并网容量达到接入系统容量较大比例后的电网稳定性<sup>[9]</sup>等问题。本文重点介绍集成服务环境下风电场的无功调节策略和风电机组无功调节的实现原理。

### 1 风电场的无功调节策略

在集成服务环境下, 风电数据采集与监控(SCADA)系统一方面通过外域网与地调 EMS 进行信息交换, 另一方面通过远程终端单元(RTU)与气象站、监测站和风电机组控制器进行信息交换。风电场的无功调节包含 2 个组件: 功率预测模块和

参数整定模块。可以根据预测的风电场最大出力来估算无功调节范围, 并把接收到的无功补偿量合理地分配至单台风电机组。

#### 1.1 功率预测

在一定的空气密度条件下, 风电机组输出功率与风速大小密切相关。由于某一地区的风速可通过当地的气象站加以预测, 进而对风电场的输出功率也可进行预测, 则设计的风能预测模块如图 1 所示。

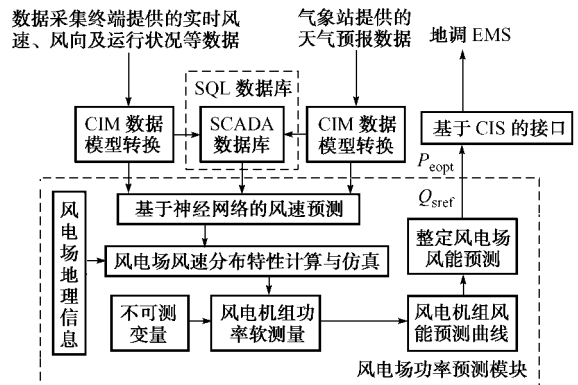


图 1 基于风速的风电场功率预测模块

Fig. 1 Power forecast module based on wind speed forecast

图 1 中首先对气象站提供的天气预报数据和数据采集终端提供的数据进行基于公共信息模型(CIM)的数据转换<sup>[10]</sup>, 以便于被其他系统所识别。然后综合风向、塔架、风剪差及历史数据等实际因素, 基于神经网络对风速进行进一步预测, 采用反向传播(BP)神经网络, 隐层神经元采用 sigmoid 函数:  $f(u) = 1 / (1 + \exp(-u))$ <sup>[11]</sup>, 输出层采用整个网络输出可以是任意的 Purelin 函数, 得到风电场的风速预测曲线。

收稿日期: 2008-03-28; 修回日期: 2008-06-23。  
国家自然科学基金资助项目(50677058); 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2007AA012476)。

此外,由于风电机组所处位置的地形地貌对风速也有不可忽略的影响,所以应加入风电场地理信息,对当台风电机组风速进行更精确、更具体的预测。由于近地面风可假设为低速、不可压缩、粘性的牛顿流体,所以其基本控制方程可为基于雷诺应力的时均 N-S 方程<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_i} = 0 \\ \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial t} + \dot{u}_j \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \dot{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} \end{cases} \quad (1)$$

直接采用微分形式的输运方程计算雷诺应力,实现对该雷诺方程的封闭。

由于风力机处于三维时变的风场环境中,受塔架、风剪差等因素的影响,基于预测的风速直接预测功率不精确,本文采用软测量方法对功率进行预测,风力机预测输出功率  $P$  的基本计算公式<sup>[13]</sup>为:

$$P = C_p A \frac{10^3 \nu^3}{2 P_N} \quad (2)$$

式中:  $C_p$  为风能转换系数;  $A$  为叶片扫掠面积;  $\rho$  为空气密度;  $\nu$  为风速;  $P_N$  为功率基值。

然后根据厂商给定的机械传动系统效率和发电机特性,预测出每台风电机的最大出力,把各台风电机出力进行整定,可预测出整个风电场的最大有功功率输出曲线  $P_{\text{eopt}}$  和最大无功容量补偿曲线  $Q_{\text{sref}}$ ,经过 SCADA 系统内基于组件接口规范(CIS)的接口传送给地调 EMS 进行潮流计算。

### 1.2 无功功率整定方案

功率预测模块向地调 EMS 上报了预测的风电场最大出力后,地调 EMS 经过全电网优化潮流计算,将向风电场下达最优无功容量补偿曲线  $Q_{\text{sopt}}$  和并网点母线电压控制参数  $U_{\text{sref}}$ ,然后由风电场 SCADA 系统对地调 EMS 下达的这些控制参数进行整定,再分派给单台风电机控制器。图 2 为本文所设计的协调控制模块。

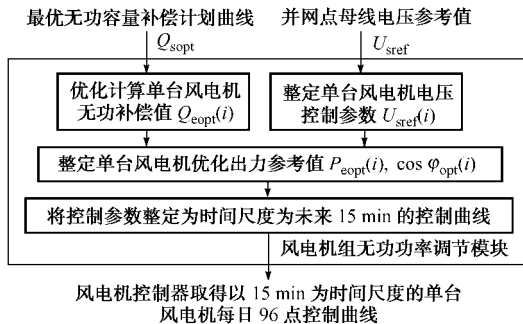


图 2 无功功率调节模块

Fig. 2 Reactive power adjusting module

单台风电机提供的有功功率  $P_{\text{eopt}}(i)$  可由下式<sup>[14]</sup>计算:

$$P_{\text{eopt}}(i) = P_{\text{Topt}}(i) \eta(i) \quad (3)$$

式中:  $P_{\text{Topt}}(i)$  为第  $i$  台风电机的最优输出功率;  $\eta(i)$  为第  $i$  台风电机的效率,一般由厂商给定。

单台风电机通过变频器注入电网的无功功率  $Q_{\text{eopt}}(i)$  和功率因数  $\cos \phi_{\text{opt}}(i)$  可由下式<sup>[15]</sup>计算:

$$\begin{cases} Q_{\text{eopt}}(i) = \frac{Q_{\text{farm(opt)}}}{Q_{\text{farm(max)}}} Q_{\text{emax}}(i) \\ \cos \phi_{\text{opt}}(i) = \frac{P_{\text{eopt}}(i)}{\sqrt{P_{\text{eopt}}^2(i) + Q_{\text{eopt}}^2(i)}} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $Q_{\text{farm(max)}}$  为整个风电场可提供的最大无功功率;  $Q_{\text{farm(opt)}}$  为地调 EMS 下达的最优无功功率;  $Q_{\text{emax}}(i)$  为第  $i$  台风电机变频器可提供的最大无功功率。

单台风电机并网电压  $U_{\text{sref}}(i)$ <sup>[16]</sup> 可由下式计算:

$$U_{\text{sref}}(i) = U_{\text{sopt}}(i) \quad (5)$$

式中:  $U_{\text{sopt}}(i)$  为第  $i$  台风电机的最优并网点电压。

通过计算,在满足地调 EMS 下达的控制参数的情况下,把整定的最优单台风电机控制参数通过控制接口单元(CIU)分派给各个风电机控制器,从而基于功率预测实现与地调 EMS 的协调控制。

## 2 风电机组无功调节的实现方案

不同风力发电技术对应的无功调节方案不同,本文以交流励磁双馈异步发电机(DFIG)及变速恒频风力发电技术为例,具体研究无功调节的实现方案。变速恒频风力发电技术是目前最有前途的风力发电技术之一,已成为国内外该领域的研究热点。此无功调节实现方案的最大优点是减小了功率变换器的容量,降低了成本,且可以实现有功、无功的独立灵活控制。以下将根据上文中 SCADA 系统下达的控制命令,分析交流励磁 DFIG 及变速恒频风力发电技术无功调节的实现。

### 2.1 交流励磁变速恒频风力发电原理

双脉宽调制(PWM)变换器交流励磁的双馈风力发电系统如图 3 所示。

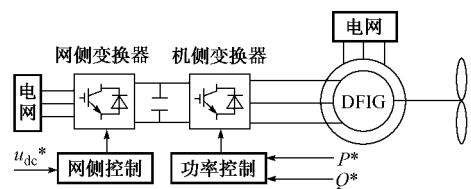


图 3 双 PWM 变换器交流励磁的双馈风力发电系统

Fig. 3 Double PWM transducer DFIG system

根据电机学知识有:

$$\frac{np}{60} \pm f_2 = f_1 \quad (6)$$

式中: $f_1$  和  $f_2$  分别为 DFIG 的定子、转子电流频率; $n$  为 DFIG 的机械转速; $p$  为 DFIG 的极对数。

由式(6)可知,当发电机转速变化时,调节转子励磁电流频率可保持定子输出电能频率恒定,这就是“变速恒频”的原理。

忽略损耗时,DFIG 的转子输入有功功率为:

$$P_2 = sP_1 \quad (7)$$

式中: $P_1$  为 DFIG 的定子输出有功功率; $s$  为转差率。

DFIG 次同步运行时, $s > 0, P_2 > 0$ ,转子交流励磁相序与定子相同,转子从电网吸收能量;DFIG 超同步运行时, $s < 0, P_2 < 0$ ,转子交流励磁相序与定子相反,转子的向电网回馈能量;当 DFIG 以同步速运行时, $s = 0$ ,转子直流励磁,转子与电网间无能量交换。

## 2.2 DFIG 的矢量控制策略

为了实现对发电机输出电压的频率控制及输出有功、无功功率的独立调节,需要对 DFIG 实行矢量变换控制,为此,应采用建立在同步速  $dq$  坐标系下的基本方程<sup>[17-18]</sup>:

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + p \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_1 \psi_{qs} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + p \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_1 \psi_{ds} \\ u_{dr} = R_r i_{dr} + p \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \omega_2 \psi_{qr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + p \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \omega_2 \psi_{dr} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (10)$$

式中:下标  $s$  和  $r$  分别代表定子和转子对应量; $u, i, R$  分别为电压、电流、电阻; $L$  和  $L_m$  分别为全自感和互感; $\omega_1$  和  $\omega_2$  分别为同步角速度和转差角速度; $\psi$  为磁链; $p$  为微分算子。

要实现  $d, q$  轴变量之间的解耦,可采用定子磁场定向,使以同步速  $\omega_1$  旋转的  $d$  轴与定子综合磁链  $\psi_m$  相重合。因  $q$  轴超前  $d$  轴  $90^\circ$ ,则有  $\psi_{ds} = \psi_m, \psi_{qs} = 0$ ,即有:

$$\begin{cases} \psi_m = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ 0 = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \end{cases} \quad (12)$$

工频条件下发电机定子电阻远小于定子绕组电抗,故可忽略定子电阻压降,则式(8)变为:

$$\begin{cases} u_{ds} = p \psi_m \\ u_{qs} = -\omega_1 \psi_m \end{cases} \quad (13)$$

发电机输出定子电压为三相平衡正弦电压,其电压幅值  $U_m = \text{常数}$ ,变换到  $dq$  同步坐标系有:

$$\begin{cases} u_{ds} = 0 \\ u_{qs} = U_m \end{cases} \quad (14)$$

根据式(13)和式(14)有  $p \psi_m = 0, \omega_1 \psi_m = U_m / L_s$ ,可知在同步速  $\omega_1$  恒定的条件下,保持  $U_m$  为恒值即可实现定子磁场定向。

以  $dq$  量表示的发电机定子侧有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  为:

$$\begin{cases} P = u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs} \\ Q = u_{qs} i_{ds} - u_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (15)$$

将式(9)代入式(10)有:

$$\begin{cases} P = u_{qs} i_{qs} = U_m i_{qs} \\ Q = u_{qs} i_{ds} = U_m i_{ds} \end{cases} \quad (16)$$

式(16)表明:发电机有功功率  $P$  与定子电流有功分量  $i_{qs}$  成正比,无功功率  $Q$  与定子电流无功分量  $i_{ds}$  成正比,只要分别控制定子电流分量  $i_{qs}$  和  $i_{ds}$  即可实现发电机有功和无功功率的独立调节。

定子电流各分量的调节可以通过调控转子绕组供电电压  $u_{dr}$  和  $u_{qr}$  来实现。由式(11)可得:

$$\begin{cases} i_{dr} = \frac{U_m}{L_m} - \frac{L_s}{L_m} i_{ds} \\ i_{qr} = -\frac{L_s}{L_m} i_{qs} \end{cases} \quad (17)$$

将式(17)代入式(11),结合式(9)可得:

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + a p i_{dr} - a_2 i_{qr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + a p i_{qr} + a_2 i_{dr} + \frac{L_m U_m}{L_s} \omega_2 \end{cases} \quad (18)$$

式中: $a = L_r - L_m^2 / L_s$ 。

为描述方便,将式(18)改写为如下形式:

$$\begin{cases} u_{dr} = u_{dr} - a_2 i_{qr} = u_{dr} - u_{dr} \\ u_{qr} = u_{qr} + a_2 i_{dr} + \frac{L_m U_m}{L_s} \omega_2 = u_{qr} + u_{qr} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $u_{dr}$  和  $u_{qr}$  为解耦项; $u_{dr}$  和  $u_{qr}$  为补偿项。

式(19)将转子电压分解为解耦项和补偿项,既简化了控制,又能保证控制精度和动态响应特性。

实现上述 DFIG 定子磁场定向矢量变换控制的系统框图如图 4 所示。图中采用了 2 个通道分别控制发电机定子电流有功分量  $i_{qs}$  和无功分量  $i_{ds}$ ,且都采用了功率外环、电流内环的双闭环控制结构。在功率闭环中,有功功率和无功功率给定值  $P^*$  和  $Q^*$  与反馈值  $P$  和  $Q$  之差经比例积分(PI)控制器运算,输出定子电流有功及无功分量给定值  $i_{qs}^*$  和  $i_{ds}^*$ 。由式(17)可知, $i_{qs}^*$  和  $i_{ds}^*$  经线性变换可得  $i_{qr}^*$  和  $i_{dr}^*$ 。在电流闭环中, $i_{qr}^*$  与反馈值  $i_{qr}$  之差经 PI 控制器运算可得  $u_{qr}$ ,再加上  $u_{qr}$  可得转子  $q$  轴电压给定值  $u_{qr}^*$ ;  $i_{dr}^*$  与反馈值  $i_{dr}$  之差经 PI 控制器运算可得  $u_{dr}$ ,再减

去  $u_{dr}$  可得转子  $d$  轴电压给定值  $u_{dr}^*$ 。

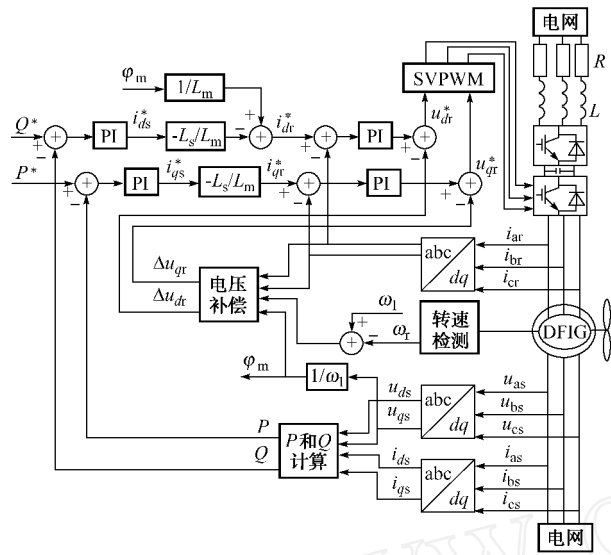


图4 DFIG定子磁场定向矢量变换控制框图  
Fig. 4 Control system of DFIG

2.3 网侧变换器的控制

双 PWM 变换器的主电路如图 5 所示。图中： $u_a, u_b, u_c$  为网侧变换器交流侧电网电压； $i_a, i_b, i_c$  为网侧变换器交流侧流入电流； $R$  和  $L$  分别为进线电抗器的等效电阻和电感； $C$  为直流环节的储能电容； $u_{dc}$  为直流环节电压。

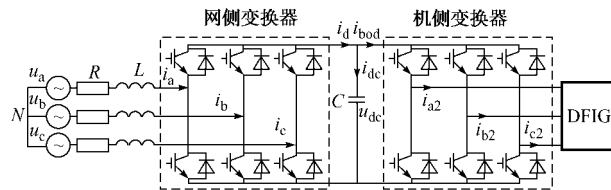


图5 双 PWM 变换器主电路结构  
Fig. 5 Circuit of double PWM transducers

仍采用坐标变换进行分析,如图 6 所示。图中： $d, q$  为两相同步速旋转坐标系； $u_j$  和  $u_k$  分别为电网电压矢量和网侧变换器交流侧电压矢量； $i$  为交流侧输入电流矢量。可以看出,控制  $u_k$  可调节  $u_j$  与  $i$  的相位差,即交流侧的功率因数角。

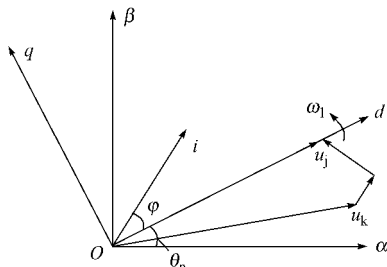


图6 网侧变换器矢量控制坐标变换  
Fig. 6 Coordinate transform of grid transducer

$dq$  坐标系下网侧变换器的数学模型<sup>[19]</sup>为：

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = -Ri_d + L_1 i_q + u_{dj} - u_{dk} \\ L \frac{di_q}{dt} = -Ri_q + L_1 i_d + u_{dq} - u_{qk} \end{cases} \quad (20)$$

式中： $u_{dj}$  和  $u_{dq}$  分别为  $u_j$  的  $d, q$  轴分量； $u_{dk}$  和  $u_{qk}$  分别为  $u_k$  的  $d, q$  轴分量； $i_d$  和  $i_q$  分别为  $i$  的  $d, q$  轴分量。

式(20)可写为：

$$\begin{cases} u_{dk} = -u_{dk} + u_{dk} + u_{dj} \\ u_{qk} = -u_{qk} - u_{qk} + u_{dq} \end{cases} \quad (21)$$

式中： $u_{dk}$  和  $u_{qk}$  为解耦项； $u_{dk}$  和  $u_{qk}$  为补偿项。

$$\begin{cases} u_{dk} = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d \\ u_{qk} = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} u_{dk} = L_1 i_q \\ u_{qk} = L_1 i_d \end{cases} \quad (23)$$

采用电网电压定向矢量控制,将  $d$  轴定于  $u_j$  方向上,此时有：

$$\begin{cases} u_{dj} = u_j \\ u_{dq} = 0 \end{cases} \quad (24)$$

式(21)可化为：

$$\begin{cases} u_{dk} = -u_{dk} + u_{dk} + u_j \\ u_{qk} = -u_{qk} - u_{qk} \end{cases} \quad (25)$$

根据式(21)~式(25)设计出网侧变换器控制系统如图 7 所示。

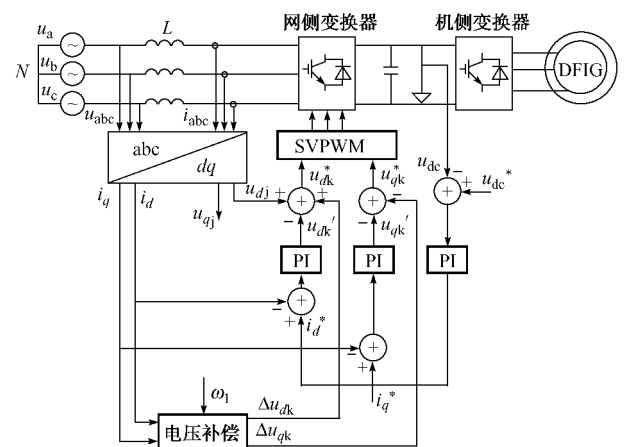


图7 网侧变换器电网电压定向矢量控制策略  
Fig. 7 Vector control of grid transducer

网侧变换器从电网吸收的有功及无功功率为：

$$\begin{cases} P_k = u_{dj} i_d + u_{dq} i_q = u_j i_d \\ Q_k = u_{dq} i_d - u_{dj} i_q = -u_j i_q \end{cases} \quad (26)$$

式中： $P_k > 0$  表示网侧变换器从电网吸收能量,工作于整流状态； $P_k < 0$  表示网侧变换器向电网回馈能

量,工作于逆变状态; $Q_k = 0$ 表示网侧变换器与电网间无无功功率交换,工作于单位功率因数状态。控制  $i_d, i_q$  可分别控制网侧变换器的直流环节电压和功率因数。

### 3 结语

本文主要讨论风电场与地调 EMS 在集成服务环境下的无功调节。对风电机群并网后无功调节的控制效果,文献[5]进行了无功负荷突变下的动态仿真,结果表明风电机组分担了系统侧的无功缺失,承担了调整无功、稳定并网点电压的任务。EMS 中有自动电压控制(AVC)系统,采用依据实测数据实时进行动态闭环控制的无功优化控制方式,本文提出的风电机组按无功补偿计划曲线调节无功功率是对 AVC 的一种补充,可降低 AVC 的调节幅度,减少代价。风电功率预测误差造成的无功补偿曲线与实际功率产生的偏差由 AVC 系统解决。

下篇文章将介绍风电场 SCADA 系统与地调 EMS 集成服务实施无功调节时信息交换的设计与实现。

### 参考文献

- [1] TANG Y F, XU L Y. A flexible active and reactive power control strategy for available speed constant frequency generating system. *IEEE Trans on Power Electronics*, 1995, 10(4): 472-478.
- [2] SLOOTWEG J G, KLING W L. The impact of large scale wind power generation on power system oscillations. *Electric Power Systems Research*, 2003, 67(1): 9-20.
- [3] TANDEJ O G. Impact of wind turbines on voltage quality// *Proceedings of the 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power: Vol 2, October 14-16, 1998, Athens, Greece: 1158-1161.*
- [4] 李晶. 变速恒频双馈风电机组动态模型及并网控制策略的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.
- [5] 李晶, 李建林, 许洪华. 基于配电网无功优化的变速恒频双馈风电机组控制策略. *电网技术*, 2006, 30(15): 59-64.  
LI Jing, LI Jianlin, XU Honghua. A control strategy of doubly-fed variable speed wind turbines based on reactive power optimization of distribution systems. *Power System Technology*, 2006, 30(15): 59-64.
- [6] 郭晓明, 贺益康, 何奔腾. 双馈异步风力发电机开关频率恒定的直接功率控制. *电力系统自动化*, 2008, 32(1): 61-65.  
GUO Xiaoming, HE Yikang, HE Benteng. Direct power control for doubly-fed induction generator wind turbines with a constant switching frequency. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(1): 61-65.
- [7] 王建贇, 伏祥运, 曾繁鹏, 等. 可连续调节容性无功的 PWM 型静止无功补偿器. *电力系统自动化*, 2005, 29(8): 71-74.  
WANG Jianze, FU Xiangyun, ZENG Fanpeng. et al. A PWM static VAR compensator with continuously variable capacitive reactive power. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(8): 71-74.
- [8] Harakosan Europe. Technical description of the Z72 wind turbine [EB/OL]. [2008-01-23]. <http://harakosan.nl/techspec.pdf>.
- [9] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题. *电力系统自动化*, 2003, 27(8): 61-65.  
LEI Yazhou. Studies on wind farm integration into power system. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(8): 61-65.
- [10] IEC 61970-301 Energy management system application program interface (EMS-API): Part 301 common information model (CIM) base. 1999.
- [11] 刘志刚, 王晓茹, 何正友, 等. 小波变换、神经网络和小波网络的函数逼近能力分析比较. *电力系统自动化*, 2002, 26(20): 36-44.  
LIU Zhigang, WANG Xiaoru, HE Zhengyou, et al. Analysis and comparison of function approximation ability based on wavelet transformation. *Automation of Electric Power Systems*, 2002, 26(20): 36-44.
- [12] 张雅, 刘淑艳, 王保国. 雷诺应力模型在三维湍流流场计算中的应用. *航空动力学报*, 2005, 20(4): 573-576.  
ZHANG Ya, LIU Shuyan, WANG Baoguo. Application of the reynolds stress model to the calculation of three-dimensional turbulent flow-field. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 20(4): 573-576.
- [13] SAAD-SAOUD Z, JEN KINS N. Models for predicting flicker induced by large wind turbines. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 1999, 14(3): 743-748.
- [14] 乔嘉康, 鲁宗相, 严慧敏, 等. 双馈感应风力发电机功率控制器的建模与仿真. *电力系统自动化*, 2007, 31(24): 34-37.  
QIAO Jiakang, LU Zongxiang, YAN Huimin, et al. Modeling and simulation of power controller for the doubly fed induction generator wind turbines. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(24): 34-37.
- [15] 伍小杰, 柴建云. 变速恒频双馈风力发电机系统交流励磁综述. *电力系统自动化*, 2004, 28(23): 92-96.  
WU Xiaojie, CHAI Jianyun. Overview of AC excitation for variable speed constant frequency double fed wind power generator systems. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(23): 92-96.
- [16] 陈宁, 于继来. 配电网中风电有功负荷分配方法. *电力系统自动化*, 2008, 32(4): 35-39.  
CHEN Ning, YU Jilai. An active load allocation method to wind power generation in distribution networks. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(4): 35-39.
- [17] 高景德, 王祥珩, 李发海, 等. 交流电机及其系统分析. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [18] 李晶, 宋家骅, 王伟胜. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真. *中国电机工程学报*, 2004, 24(6): 100-105.  
LI Jing, SONG Jiahua, WANG Weisheng. Modeling and dynamic simulation of variable speed wind turbine with large capacity. *Proceeding of the CSEE*, 2004, 24(6): 100-105.

(下转第 103 页 continued on page 103)

提出采用基于故障类型的零序方向元件,通过理论分析及现场数据的验证,可以证明该方向元件可以根本解决弱电强磁模型下零序方向误判的问题。

### 参考文献

- [1] 曾耿晖,黄明辉,刘之尧,等.同杆线路纵联零序保护误动分析及措施.电力系统自动化,2006,30(20):103-107.  
ZENG Genghui, HUANG Minghui, LIU Zhiyao, et al. Analysis and countermeasures of misoperation of zero sequence pilot protection on circuit lines of same pole. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(20): 103-107.
- [2] 郭润生,何彩虹,鄧建杰.相邻线路零序互感对线路零序纵联方向保护的影响.继电器,2004,32(9):71-73.  
GUO Runsheng, HE Caihong, ZHI Jianjie. Influence of zero-

- sequence mutual inductance to pilot protection in parallel lines. Relay, 2004, 32(9): 71-73.
- [3] 索南加乐,孟祥来,陈勇,等.基于故障类型的零序方向元件.中国电机工程学报,2007,27(1):25-30.  
SUONAN Jiale, MENG Xianglai, CHEN Yong, et al. A novel zero sequence directional element based on fault type. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 25-30.

樊占峰(1974→),男,通信作者,工程师,主要研究方向:继电保护。E-mail: zhanfengf@xjgc.com  
叶东印(1971→),男,工程师,主要研究方向:继电保护、电力系统生产运行管理。  
李瑞生(1966→),男,教授级高级工程师,主要研究方向:继电保护。

## Improvement of Zero-sequence Directional Relay for the Parallel Line with Magnetically Strong and Electrically Weak Connection

FAN Zhanfeng<sup>1</sup>, YE Dongyin<sup>2</sup>, LI Ruisheng<sup>1</sup>, LIAN Haitao<sup>1</sup>

(1. XI Electrical Company, Xuchang 461000, China; 2. Xuchang Power Supply Company, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** According to the several mal-operation accidents of zero-sequence pilot protection happened recently in the high-voltage power network due to the influence of zero-sequence mutual inductance between power lines, this paper analyzes the typical power network topologies with magnetically strong and electrically weak connection that caused the mal-operation. The influence of zero-sequence mutual inductance on the behaviors of zero-sequence pilot protection is studied in detail and several countermeasures are analyzed. A new type of zero-sequence directional relay based on fault type is proposed and the feasibility and detail scheme flow are described. The scheme is validated to be correct by the data analysis of two local examples.

**Key words:** zero-sequence pilot protection; fault types; polarization; magnetically strong and electrically weak connection

(上接第 87 页 continued from page 87)

- [19] 赵仁德,贺益康.变速恒频风力发电机用交流励磁电源研究.电工技术学报,2003,19(6):1-6.  
ZHAO Rende, HE Yikang. Investigation of AC excitation power supply used in VSCF wind-power generation. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 19(6): 1-6.

段 斌(1966→),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统自动化。E-mail: db61850@163.com  
吴亚联(1973→),女,通信作者,硕士,讲师,主要研究方向:电力电子与电力传动。E-mail: yalian\_wu@163.com  
周立明(1983→),男,硕士研究生,主要研究方向:风力发电变频器。

## Reactive Power Regulation of Grid-connected Wind Farm Based on Application Integration Part Reactive Power Regulation

DUAN Bin, WU Yalian, ZHOU Liming  
(Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**Abstract:** Based on the wind farm output forecasting and local electric network reactive power optimization results, the wind turbines electric control parameters are calculated as inputs to the reactive power controller. A reactive power regulation method based on application integration is proposed. The processes of power forecasting and parameter setting in the wind farm supervisory control and data acquisition (SCADA) system are discussed. The doubly fed induction generator (DFIG) wind turbine is used as an example to show how to adjust reactive power.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50677058) and National High-Tech Research and Development Program of China (No. 2007AA012476).

**Key words:** reactive power adjusting; application integration; supervisory control and data acquisition (SCADA); wind energy generation; doubly fed induction generator (DFIG)