

计及风电场的发输电可靠性评估

姜文, 严正, 杨建林

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 为了评估风电并网对发输电系统可靠性的影响, 建立了基于序贯蒙特卡罗方法的风电场发输电可靠性模型。该模型充分考虑了机组、线路、变压器以及风力发电机等设备元件的运行状态, 同时采用了最优切负荷, 给出具体的算法流程, 并提出可靠性指标 BIEWG。算例采用 IEEE-RTS 测试系统, 风电场是由 100 台 V90-2 MW 的双馈异步风力发电机组成, 风速数据取自东海风电场。仿真结果验证了所提算法的正确性, 风电机组的接入对提高发输电组合系统的可靠性具有明显的作用。该算法可以被系统规划者用来有效地评估风电并网对系统可靠性的影响。

关键词: 序贯蒙特卡罗; 可靠性; 最优切负荷; 双馈异步风力发电机

Reliability assessment of composite generation and transmission system considering wind farms

JIANG Wen, YAN Zheng, YANG Jian-lin

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to evaluate the effect of grid-connected wind farms on the power system reliability, a wind farm reliability model based on sequential Monte Carlo is established. The operation state of conventional generating units, transmission lines, transformers and wind turbine are considered thoroughly in this model. Meanwhile, an optimal load shedding model is used and a detailed flow diagram of the algorithm is established. The reliability index BIEWG (the benefit of interrupted expectation from wind generation) is proposed. The IEEE-RTS test system is adopted in the algorithm. Wind farm is made up of 100 doubly fed wind turbine of V90-2 MW. Wind speed data come from Donghai wind farm. The simulation results verify the correctness of the algorithm, and show that the wind power reliability can be improved after the wind turbine is switched in. The proposed algorithm can be utilized by power system planners to effectively evaluate the effect of grid-connected wind farms on power system reliability.

Key words: sequential Monte Carlo; reliability; optimal load shedding; doubly fed wind turbine

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0126-05

0 引言

风力发电以其无污染和可再生性, 日益受到世界各国的广泛重视, 近年来得到了迅速的发展。然而, 由于风能的随机性和间歇性特点, 有效地评估风电并网对系统可靠性的影响已成为急需解决的关键问题之一^[1-2]。

目前国内外学者关于风电并网对系统可靠性影响已做了大量的研究。文献[2]建立了基于蒙特卡罗仿真的风力发电容量可信度的评估框架; 文献[3]利用基于时间序列的仿真方法, 计算系统的可靠性指标中断缺电量 *EENS* 和中断损失期望 *ECOST*; 文献[4-5]提出了风机可中断能量效益 (the wind generation

interrupted energy benefit, *WGIEB*)、风机可中断代价效益(the wind generation interruption cost benefit, *WGICB*)、等效传统发电机个数 (the equivalent number of conventional generators, *ENCG*)、等效传统发电机容量 (the equivalent conventional generator capacity, *ECGC*) 等可靠性指标来评估加入风机之后对系统的可靠性的影响; 文献[6]建立风电场的概率模型评估对系统可靠性的影响; 文献[7]通过比较时序方法和概率方法, 评估风电并网对系统可靠性的影响; 文献[8]将传统常规机组和风电机组进行分组处理, 采用解析法评估风电可靠性; 文献[9]采用蚁群算法对风电可靠性进行评估; 文献[10]采用序贯蒙特卡罗方法对含有风电场的配电系统进行可靠性评估。

然而目前所做的研究主要集中在风电并网对

基金项目: 国家 863 专项科研基金项目 (2007AA05Z458)

发电系统以及配电系统可靠性的影响, 在这些研究中不考虑系统线路和变压器的故障, 认为它们是百分之百的可靠。本文研究了风电并网对发输电系统可靠性的影响。计及线路、变压器以及发电机的故障, 利用最优切负荷算法, 采用时序 Monte Carlo 方法进行系统仿真, 并提出可靠性指标 (the benefit of interrupted expectation from wind generation, BLEWG), 通过计算 LOLP、EENS、LOLE、BLEWG 等可靠性指标来反映加入风电场对系统可靠性的影响。算例采用 IEEE-RTS 测试系统, 风电场是由 100 台 V90-2 MW 的双馈异步风力发电机组成, 风速数据取自东海风电场。仿真结果验证了所提算法的正确性, 风电机组的接入对提高发输电组合系统的可靠性具有明显的作用。该算法可以被系统规划者用来有效地评估风电并网对系统可靠性的影响。

1 风电场仿真模型

1.1 风机出力模型

风机出力与风速之间有个非线性关系式如式 (1):

$$P_{\text{out}} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{ci} \\ (A + Bv + Cv^2)p_r & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ p_r & v_r \leq v \leq v_{co} \\ 0 & v \geq v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$A = \frac{1}{v_{ci} - v_r} [v_{ci}(v_{ci} + v_r) - 4(v_{ci} \times v_r) \left(\frac{v_{ci} + v_r}{2v_r}\right)^3];$$

$$B = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} [4(v_{ci} + v_r) \left(\frac{v_{ci} + v_r}{2v_r}\right)^3 - (3v_{ci} + v_r)];$$

$$C = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} [2 - 4\left(\frac{v_{ci} + v_r}{2v_r}\right)^3];$$

式中: P_r 为风力机组额定出力; v_{ci} 为切入风速; v_r 为额定风速; v_{co} 为切出风速。

1.2 双馈异步风力发电机的数学模型^[11-12]

双馈异步发电机的 T 型等效电路如图 1 所示。

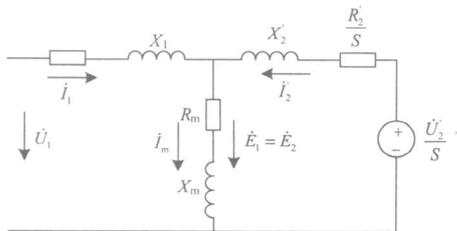


图 1 双馈异步发电机 T 型等效电路

Fig.1 DFIG equivalent circuit of T connection

其中: \dot{U}_1 、 \dot{U}_2' 分别是定子 (电网) 电压和折算后的转子电压相量; \dot{E}_1 、 \dot{E}_2' 是气隙磁场感应电势相量; i_1 、 i_2' 、 i_m 分别是定子电流、折算后转子电流和励磁电流相量; R_1 、 R_2' 、 R_m 分别表示定子电阻、折算后的转子电阻和励磁电阻; X_1 、 X_2' 、 X_m 表示定子漏感抗、折算后的转子漏抗和励磁电抗。

当忽略电机损耗并取定子为发电机惯例而转子为电动机惯例时, 发电机的定子输出功率 P_1 等于转子输入功率 P_2 与电机轴上输入机械功率 P_m 之和, 即:

$$P_1 = P_2 + P_m \quad (2)$$

根据感应电机的运行原理, 转子绕组的电功率和电机轴上的机械功率可分别表示为:

$$P_2 = sP_1 \quad (3)$$

$$P_m = (1-s)P_1 \quad (4)$$

式中, s 为转差率。

由式 (2) ~ (4) 可知, 当发电机在亚同步运行时, $s > 0$, 需要向转子绕组馈入电功率, 由转子传递给定子的电磁功率为 sP_1 , 风力机传递给定子的功率只有 $(1-s)P_1$ 。当发电机在超同步运行时, $s < 0$, 此时转子绕组向外供电, 即定转子同时发电, 此时风力机供给发电机的功率增至 $(1+|s|)P_1$ 。双馈发电机在低于和高于同步速不同的运行方式下的输入输出功率关系如图 2 所示。

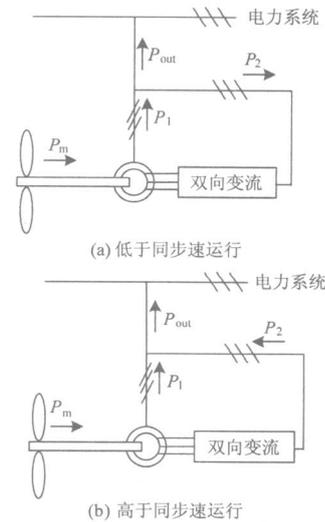


图 2 双馈风力发电机功率流向

Fig.2 Power flow of doubly fed wind turbine

2 最优切负荷

发输电系统可靠性评估由三部分组成: 系统状态选取、系统状态分析和系统可靠性指标的计算。

系统状态分析包括对选中的系统状态进行潮流计算,以确定系统是否违背运行约束,如违反,则采取补救措施对系统运行状态进行调整。这些补救措施包括发电机出力调整、变压器档位调整、柔性交流输电元件的参数调整等。调整后,若系统仍不能恢复到安全状态,则系统状态是一个故障状态,最后需要进行负荷消减^[13]。为了尽可能减小切负荷量,本文采用专门的最优潮流模型,其模型的目标函数是负荷消减总量最小,最优解就是各负荷母线上的负荷消减量。由于基于直流潮流的最优潮流模型没有考虑电压和无功,因此本文采用基于交流的最优潮流模型。

基于交流潮流的发电输电系统风险评估最优潮流模型可描述如下:

$$\min \sum_{i \in ND} C_i \quad (5)$$

约束条件:

$$P_i(V, \delta) + PW_i - PD_i + C_i = 0 \quad i \in ND \quad (6)$$

$$Q_i(V, \delta) + QW_i - QD_i = 0 \quad i \in ND \quad (7)$$

$$PG_i^{\min} \leq P_i(V, \delta) \leq PG_i^{\max} \quad i \in NG \quad (8)$$

$$QG_i^{\min} \leq Q_i(V, \delta) \leq QG_i^{\max} \quad i \in NG \quad (9)$$

$$0 \leq C_i \leq PD_i \quad i \in ND \quad (10)$$

$$T_k(V, \delta) \leq T_k^{\max} \quad k \in L \quad (11)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i \in N \quad (12)$$

式中: P_i , Q_i 分别是母线 i 的注入有功和注入无功; PW_i , QW_i 分别是母线 i 注入的风机出力的有功和无功, 本文对双馈风机采用恒功率因数控制模式; V 和 δ 分别是母线电压的幅值和相角矢量; V_i 是 V 的元素; PD_i 和 QD_i 分别是母线 i 上的有功和无功负荷; C_i 是母线 i 的负荷消减变量; PG_i^{\min} 、 PG_i^{\max} 、 QG_i^{\min} 和 QG_i^{\max} 分别是发电母线 i 上注入有功和注入无功的下限和上限; T_k 是线路 k 上的潮流; T_k^{\max} 是线路 k 上的额定容量; V_i^{\min} 和 V_i^{\max} 分别是母线 i 上电压幅值的下限和上限; ND 、 NG 、 L 和 N 分别是系统中负荷母线、发电母线、所有支路和所有母线的集合; P_i 、 Q_i 和 T_k 分别有以下表达式:

$$P_i(V, \delta) = V_i \sum_{j \rightarrow i} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (13)$$

$$Q_i(V, \delta) = V_i \sum_{j \rightarrow i} V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (14)$$

式中: $j \rightarrow i$ 表示 j 是与母线 i 直接连接的母线; G_{ij} 和 B_{ij} 分别表示母线导纳矩阵第 i 行第 j 列元素的实部和虚部; δ_{ij} 是相角差, 即 $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ 。

$$T_k(V, \delta) = \max \{T_{mn}(V, \delta), T_{nm}(V, \delta)\}$$

式中: $T_{mn}(V, \delta)$ 和 $T_{nm}(V, \delta)$ 分别是线路 k 两端的潮流; m 和 n 分别表示线路 k 两端的母线号。从母线 m 到 n 的潮流计算如下:

$$T_{mn}(V, \delta) = \sqrt{P_{mn}^2(V, \delta) + Q_{mn}^2(V, \delta)} \quad (15)$$

$$P_{mn}(V, \delta) = V_m^2 (g_{m0} + g_{mn}) - V_m V_n (b_{mn} \sin \delta_{mn} + g_{mn} \cos \delta_{mn}) \quad (16)$$

$$Q_{mn}(V, \delta) = -V_m^2 (b_{m0} + b_{mn}) + V_m V_n (b_{mn} \cos \delta_{mn} - g_{mn} \sin \delta_{mn}) \quad (17)$$

其中: g_{mn} 和 b_{mn} 分别是线路 k 的支路导纳的实部和虚部; g_{m0} 和 b_{m0} 分别是母线 m 对地支路的等值导纳的实部和虚部。

3 风电系统可靠性仿真流程

发电输电可靠性评估的目标是获得发电输电系统

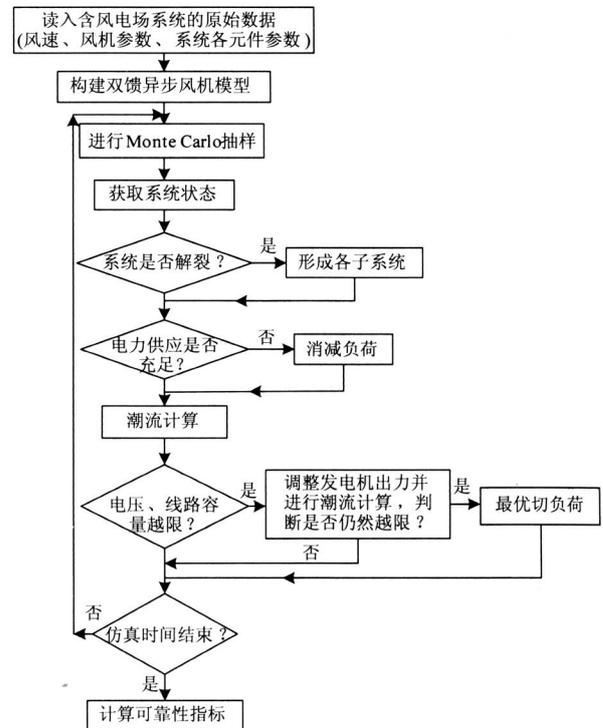


图 3 含风电场的发电输电可靠性评估流程

Fig.3 The flow diagram of the algorithm

各种出现的状态概率和切负荷情况,然后统计可靠性指标。本文首先根据风速数据、风机参数数据,利用风机出力模型,计算出双馈异步风力发电机的机械功率 P_m ,然后依照双馈风机的数学模型,计算出不考虑风机故障时的出力 P_1 ,接下来对各风电机组、常规机组、线路进行Monte Carlo抽样,随后对系统进行判断、统计,最后计算出可靠性指标。具体流程如图3所示。

4 算例及结果分析

本文采用IEEE-RTS测试系统验证所提算法的正确性。测试系统的具体参数参考文献[14]。风电场是由100台2 MW的双馈异步风机组成,风速数据取自东海风电场。风机参数见文献[15],设风机的强迫停运率为0.04。

为了比较风电场从不同节点接入电网和从单一节点接入电网对系统可靠性的影响,本文首先分两种情况进行仿真分析。一是:在18号节点接入由100台机组组成的风电场;另一种是:在1号节点和18号节点分别接入50台相同参数的风机组成的风电场。之所以选择18号节点和1号节点,是因为18号节点只有一台400 MW的发电机,它的故障率在所有的机组中是最高的,故其对系统的影响比较大,而1号节点在系统中被选作平衡节点。其仿真结果如图4所示。集中接入和分散接入时,系统的LOLE分别是7.13 h/年、6.25 h/年,下降了12.34%,系统的EENS分别从2 482.49 MW/年下降到2 310.38 MW/年,减少了6.9%。很明显,第二种情况的可靠性要比第一种情况的好很多。为了反映风力发电的分散性,本文后面的仿真都是基于第二种情况。

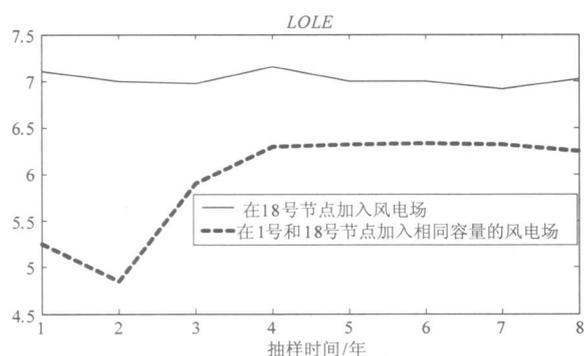


图4 集中和分散加入风电场所对应系统的停电期望

Fig.4 The system's LOLE for centralized and dispersible cases

图5描述系统可靠性随风机台数的变化,从中可以明显地看出,系统可靠性随着风机台数的增加而增强。开始加入风机时,对系统的可靠性影响比较大,随着风机台数的增加,影响逐渐趋于饱和。

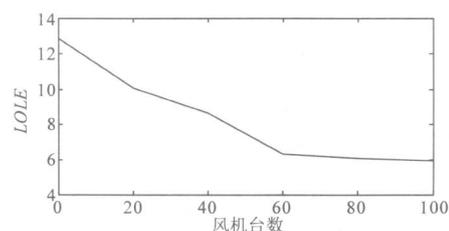


图5 系统停电期望随风机台数的变化

Fig.5 The system's LOLE with the number of wind turbines

定义可靠性指标 $BIEWG$ (the benefit of interrupted expectation from wind generation) 为:

$$BIEWG = \frac{LOLE_{bw} - LOLE_{aw}}{\text{Incremental WTG capacity}}$$

其中: $LOLE_{bw}$ 是加入风电场之前的系统停电期望; $LOLE_{aw}$ 是加入风电场之后的系统停电期望。从此定义可以明显地看出,指标 $BIEWG$ 可以很好地反映并网风电容量对系统可靠性的影响。从图6可知系统的 $BIEWG$ 是 $7.7051e-006$, $BIEWG$ 越大,表明加入相同的风电功率对系统的可靠性贡献越大。从图6可以明显地看出,在原系统加入风电场后,系统的停电期望从12.832 4下降到5.939 7,下降了53.71%,利用相同容量的风电场代替原系统中的常规机组后,系统的停电期望从12.832 4上升到19.885 9,上升了54.97%。由此表明风电场出力的不确定性,相同容量的常规机组要比风电机组对系统的可靠性贡献大。

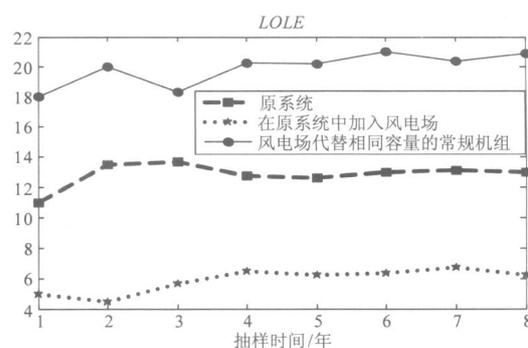


图6 三种不同状态 LOLE 指标曲线图

Fig.6 The system's LOLE for the three cases

从图7可知,在原系统加入风电场后,系统的年停电量有显著的减小, $EENS$ 从3 755.4 MW/年减小到2 363.6 MW/年,减小了37.06%,同时可以看到利用风电场代替原系统中相同容量的常规机组,系统的年停电量比原系统有明显增加, $EENS$ 从3 755.4 MW/年增加到6 115.7 MW/年,增加了62.85%。可靠性指标 $WGIEB$ (the Wind Generation

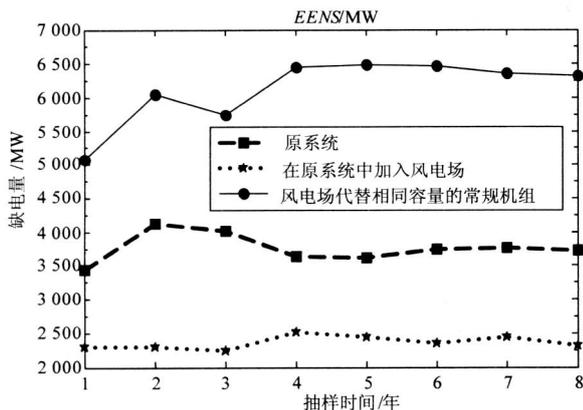


图 7 三种不同状态 EENS 指标曲线图

Fig.7 The system's EENS for the three cases

Interrupted Energy Benefit) 被定义为:

$$WGIEB = \frac{EENS_{bw} - EENS_{aw}}{\text{Incremental WTG capacity}}$$

其中: $EENS_{bw}$ 是加入风电场之前的系统停电量; $EENS_{aw}$ 是加入风电场之后的系统停电量。从图 7 可得加入风电场之后 $WGIEB$ 是 0.001 6。为了分析风电机组对常规机组的等效替代容量, 本文采用二分法进行模拟, 其结果是 100 台 V90-2 MW 的双馈异步风力发电机与 78.35 MW 的常规机组具有相同的可靠性指标, 由此可知风电机组的等效替代容量率是 39.13%。

5 结语

本文建立了基于序贯蒙特卡罗方法的风电场输电可靠性模型, 该模型充分考虑了机组、线路、变压器以及风力发电机等设备元件的运行状态, 同时采用了最优切负荷, 给出具体的算法流程, 并提出可靠性指标 BIEWG。算例采用 IEEE-RTS 测试系统, 风电场是由 100 台 V90-2 MW 的双馈异步风力发电机组成, 风速数据取自东海风电场。仿真结果验证了所提算法的正确性, 同时验证了风电出力的不确定性, 以及风电场分散接入要比集中接入对系统可靠性贡献大。该算法可以被系统规划者用来有效地评估风电并网对系统可靠性的影响。

参考文献

[1] 吴义纯, 丁明. 基于蒙特卡罗仿真的风力发电系统可靠性评价[J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (12): 70-73. WU Yi-chun, DING Ming. Reliability assessment of wind power generation system based on Monte-Carlo simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (12): 70-73.

[2] 王海超, 鲁宗相, 周双喜. 风电场发电容量可信度研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (10): 103-106.

WANG Hai-chao, LU Zong-xiang, ZHOU Shuang-xi. Reliability of the capacity credit of wind energy resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (10): 103-106.

[3] Wang P, Billinton R. Time-sequential simulation technique for rural distribution system reliability cost/worth evaluation including wind generation as alternative supply[J]. IEE Proc-Gener, Transm, and Distrib, 2001, 148 (4): 355-360.

[4] Billinton R, Gan L. Wind power modeling and application in generating adequacy assessment[C]. //WESCANEX 93. Communications, Computers and Power in the Modern Environment. Conference Proceedings, IEEE. Canada: 1993: 100-106.

[5] Wang Peng, Billinton Roy. Reliability benefits analysis of adding WTG to a distribution system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16 (2): 134-139.

[6] Karaki S H, Salim B A, Chedid R B. Probabilistic model of a two-site wind energy conversion system[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2002, 17 (4): 530-536.

[7] Castro R M G, Ferreira L A F M. A comparison between chronological and probabilistic methods to estimate wind power capacity credit[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16 (4): 904-909.

[8] Singh C, Lago-Gonzalez A. Reliability modeling of generation systems including unconventional energy sources[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1985, 104 (5): 1049-1056.

[9] Wang Lingfeng, Singh C. Adequacy assessment of power-generating systems including wind power integration based on ant colony system algorithm[C].// Power Tech, IEEE. Lausanne: 2007: 1629-1634.

[10] Billinton Roy, Wang Peng. Teaching distribution system reliability evaluation using Monte Carlo simulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14 (2): 397-403.

[11] 胡家兵, 孙丹, 等. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (8): 21-26. HU Jia-bing, SUN Dan, et al. Modeling and control of DFIG wind energy generation system under grid voltage Dip[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (8): 21-26.

[12] 林成武, 王凤翔. 变速恒频双馈风力发电机励磁控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (11): 122-125. LIN Cheng-wu, WANG Feng-xiang. Study on excitation control of VSCF doubly fed wind power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (11): 122-125.

[13] 赵渊, 周家启, 刘洋. 发输电组合系统可靠性评估中的最优负荷消减模型分析[J]. 电网技术, 2004, 28 (10): 34-37.

(下转第 178 页 continued on page 178)

作了6个月,预计可以继续正常工作3~5年。图6为该系统在现场的安装实例图片。

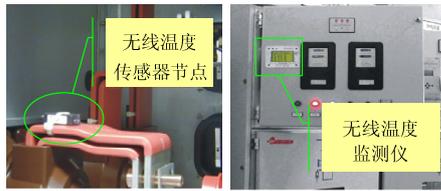


图6 现场应用实例

Fig.6 Application case at worksite

4 结语

本文基于 ZigBee 无线通信技术、CAN 总线技术,研发了电力高压触点温度无线监测系统。该系统由 ZigBee 节点测量高压触点温度,上传给主节点(监测仪),再通过 CAN 总线将温度数据发送到监测主机,完全解决了测量高压设备时的绝缘问题,形成了一套可靠性高、测量准确、价格合理、易于安装、易于管理、易于维护的解决方案,为电力系统的安全运行提供了有力支持。

参考文献

[1] 刘建胜, 酆达, 张凡. 一种用于变电站高压触点温度在线监测的新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 54-57.
 LIU Jian-sheng, FENG Da, ZHANG Fan. A novel method for remote on-line temperature detection of substation high-voltage contacts[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (4) : 54-57.

[2] 杨武, 王小华, 荣命哲, 等. 基于红外测温技术的高压电力设备温度在线监测传感器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (9) : 113-117.
 YANG Wu, WANG Xiao-hua, RONG Ming-zhe, et al.

On-line temperature measurements with infrared technology on high voltage device[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (9) : 113-117.

[3] 彭超, 赵健康, 苗付贵. 分布式光纤测温技术在线监测电缆温度[J]. 高电压技术, 2006, 32 (8) : 43-45.
 PENG Chao, ZHAO Jian-kang, MIAO Fu-gui. Distributed temperature system applied in cable temperature measurement[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32 (8) : 43-45.

[4] Jones S, Bucea G, Mcalpine A. Condition monitoring system for trans grid 330 kV power cable[C]. //2004 International Conference on Power System Technology-Power Con. Singapore: 2004.

[5] Rogersaj. Distributed optical fiber sensors for the measurement of pressure, strain and temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (9) : 126-131.

[6] Dakin J P, Pratt D J. Fiber-optic distributed temperature measurement: a comparative study of techniques[J]. IEEE Digest, 1986, 74 (10) : 1-4.

[7] 郭宗莲. 基于nRF9E5的高压接点无线测温系统研制[J]. 电力自动化设备, 2008, 23 (12) : 66-68.
 GUO Zong-lian. Wireless high-voltage contactor temperature measuring system based on nRF9E5[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 23 (12) : 66-68.

收稿日期: 2010-08-19; 修回日期: 2010-09-16

作者简介:

邢晓敏 (1973-), 女, 工学硕士, 讲师, 从事电气设备在线检测与状态维修等研究工作; E-mail: xxmlyt@126.com

李波 (1969-), 女, 工学硕士, 工程师, 主要从事科研管理工作;

陈静 (1975-), 女, 大专, 工程师, 从事电气设备安全运行工作。

(上接第 130 页 continued from page 130)

ZHAO Yuan, ZHOU Jia-qi, LIU Yang. Analysis of optimal load shedding model in reliability evaluation of composite generation and transmission system[J]. Power System Technology, 2004, 28 (10): 34-37.

[14] IEEE reliability test system[R]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1997, 98(6): 2047-2054.

[15] Vestas_Product_brochure_V90_a_CH_LR[EB/OL]. http://www.vestas.com/cn/cn/core-business/product/-v90-2.0mw.aspx.

收稿日期: 2009-11-12; 修回日期: 2010-03-03

作者简介:

姜文 (1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为新能源、电力系统可靠性分析; E-mail: clintonjiang@sjtu.edu.cn

严正 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力市场、电力系统稳定分析;

杨建林 (1980-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力市场、电力系统稳定分析。