

基于WT的风电场电能损耗计算与分析

风能随机性和间歇性的特性决定了风力发电机输出电能随时间变化的随机性，同样决定了风电场电能损耗计算的复杂性。基于风资源评估软件WT和风电场各个耗能设备电气特性建立风电场损耗计算模型，运用Matlab软件较为准确地计算出了整个风电场损耗，为评估风电场经济性提供了参考依据。

康 慨 卢 胜/湖北省电力勘测设计院

0 引言

风能的随机性和间歇性决定了风力发电机组输出电能随时间变化的随机性，也决定了风电场电能损耗的波动性和计算复杂性。而在风电场工程的前期开发及可行性研究阶段，风电场年上网电量和无功损耗直接影响着整个风电场的投资收益和电网安全性。

目前设计工作中，风电场的损耗大多根据经验按照3%~5%估算，没有进行具体的计算。部分学者给出了功率阶梯法、概率分布法和随机出力时间模型法等计算方法^[1-3]，但以上计算方法忽略了风电场中风机之间的相互影响以及风机出力随天气和季节变化的特性。若在研究风电场的风力发电机出力特性时采用详细的风机模型，由于分析及计算量过大，而且计算所需的基础数据量较大，甚至还可能出现计算不收敛的情况，因此很难准确地确定风力发电机的出力和风电场的电能损耗^[4]。为了避免上述问题，在工程上探讨风电场电能损耗计算的可行性，本文避开对每台风力发电机的详细建模，结合风机厂商提供的风机特性参数（如轮毂高度、叶片长度、功

率曲线及推力曲线）、风电场场区地形地貌资料以及风电场场区的代表性测风塔的测风序列资料，运用风资源评估软件Metodyn WT计算每个风机点位的10 min/1 h功率时间序列，并结合风电场中各个耗能设备电气特性建立风电场电能损耗模型，同时运用数学软件Matlab进行计算，为以后风电场电能损耗计算提供参考。

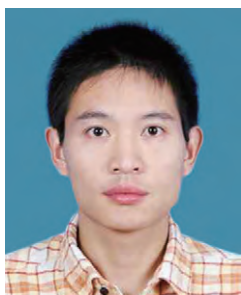
1 风电场电能损耗分析

为详细计算风电场电能损耗，需进行风电场电力系统潮流计算，该计算主要在于建立风电场电力网络结构图，根据风机的功率、负载功率和母线电压计算网络节点的电压、各个支路的功率及功率损耗。

纵观整个风电场，电能损耗主要包含两大部分：一是从风机到上网计量点之间交流通路上的主要电气设备损耗，包括风机本体损耗、风机辅助变压器损耗、箱式变压器损耗、集电线路损耗、无功补偿设备损耗和接地变压器损耗；二是站用电损耗，主要包括通信设备、二次屏柜、照明、UPS电源、检修电源及生产辅助系统等。为此需要计算风力发电机出力时间序列，并建立各个主要耗能电气器件的损耗模型。

2 风电场风力发电机组出力时间序列

为了计算风电场电力系统潮流，首要问题是对风机功率时间序列进行计算。纵观近二十年来的风电产业发展，



康 慨/硕士研究生

关键词/Keywords

风能·
损耗·
WT·
Matlab·

国内外相继开发了各种风资源评估和发电量计算软件,其中以丹麦Risø国家实验室开发的WASP软件和法国美迪公司开发的Meteodyn WT软件具有代表性。WASP采用线性模型计算方法,对地形相对简单的地区比较适用,对较复杂地形有一定的局限性。Meteodyn WT采用流体力学计算方法(CFD),该软件适用于任何地形条件的风流自动测算,能减少复杂地形条件下评估的不确定性,得到整个场区的风流情况。Meteodyn WT通过载入地形数据,定义绘图区域、测风点和结果点,并计算一系列风向数据来获得定向结果,推算出一定区域的风资源分布,还可以修正地形对风速测量的影响,进行长期风流数据的调整^[5-6]。经国内外理论及实践证明,Meteodyn WT软件能较好地模拟出风电场场区各风力发电机组的风速和功率时间序列。

通常来说,风机厂家给定的风机功率曲线为有功功率,且已考虑了发电机损耗、轮毂至塔筒底部线路损耗以及风机变频器损耗。双馈/直驱风力发电系统通常以捕获最大风能、输出最大有

功功率为主要目标,有功功率给定根据最大风能捕获选择,而无功功率给定分为两种模式:在正常情况下采用优化模式,参考值依据最小损耗的原则选取;在电网电压波动或降落时,采用通过变流器对电网提供无功电压支撑的功能,这种控制策略在正常情况下可以减轻风力发电场对无功功率的补偿压力,减少风力发电场的无功补偿容量。本文暂考虑风机在正常情况下的工作情况,在正常情况下双馈/直驱风力发电系统运行的功率因数范围为 $-0.95 \sim 0.95$,风电机组自身发生的无功功率为 $-30\% \sim 30\%$ ^[7-9]。

3 主要电气设备损耗模型

3.1 变压器等效损耗模型

风电场场区内损耗主要以变压器损耗为主,变压器包括风机辅助变压器、箱式变压器、主变压器、站用变压器和接地变压器。此类变压器以双绕组变压器为主,变压器的等效电路如图1所示,有功功率和无功功率损耗表达式为^[10]

$$\begin{cases} \Delta P_{FT} = K_T 3I^2 R_T + 3U_N^2 G_T + P_{FL} = K_T P_{CU} \beta^2 + P_{FE} + P_{FL} \approx K_T P_k \beta^2 + P_0 + P_{FL} \\ \Delta Q_{FT} = 3I^2 X_T + 3U_N^2 B_T + Q_{FL} = K_T Q_k \beta^2 + Q_0 + Q_{FL} \approx \frac{K_T U_k \% S_e \beta^2}{100} + \frac{I_0 \% S_e}{100} + Q_{FL} \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} I = \frac{P_{out}}{\sqrt{3}U_N} \\ R_T = P_{CU} \frac{U_N^2}{S_N^2} \approx P_k \frac{U_N^2}{S_N^2} \\ G_T = \frac{P_{FE}}{U_N^2} \approx \frac{\Delta P_0}{U_N^2} \\ Q_0 = I_0 \% S_e / 100 \\ Q_k = U_k \% S_e / 100 \\ X_T = \frac{U_k \%}{100} \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} = \frac{U_k \%}{100} \frac{U_N^2}{S_N} \\ B_T \approx \frac{I_0 \%}{100} \frac{\sqrt{3}I_N}{U_N} = \frac{I_0 \% S_N}{100 U_N^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中, ΔP_{FT} 、 ΔQ_{FT} 为变压器的有功、无功损耗; P_{out} 为输出功率; U_N 为线额定电压; P_{FL} 、 Q_{FL} 为变

压器负载有功、无功损耗; P_0 为变压器空载损耗; P_k 为变压器短路损耗; Q_0 为变压器空载无功损耗; Q_k 为变压器额定负载漏磁功率; $I_0\%$ 为变压器空载电百分数; $U_k\%$ 为变压器短路阻抗百分数; K_T 为变压器负载波动损耗系数; β 为平均负载系数 $\beta = P_L / S_e \cos \varphi$, P_L 为统计期内变压器低压侧有功功率, S_e 为变压器额定容量, $\cos \varphi$ 为统计期内低压侧加权平均功率因数。

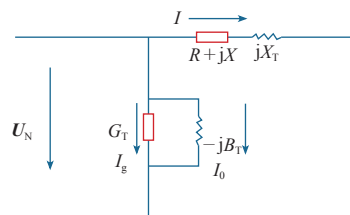


图1 双绕组变压器T形等效电路

3.2 集电线路损耗模型

风电场集电线路常被分成若干段,需将连接在同一条集电线路上的风电机组建立等效模型。设 m 台风电机组为干线式连接,其结构如图2所示,PCC为风电场集电线路公共连接点。单端线路的 π 形等效电路如图3所示。

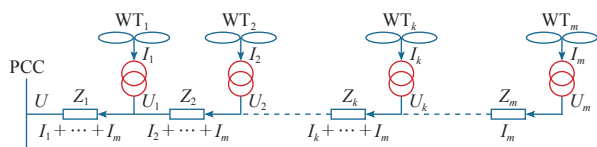


图2 风电场干线式结构

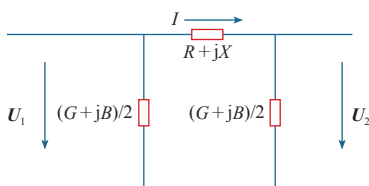


图3 单端线路 π 形等效电路

根据图2可得, U_k 与PCC之间的电压差如式(3)所示, 据此可推算出每个节点 k 的电压, 即

$$\Delta U_k = \frac{\sum_{i=1}^k (Z_i \sum_{j=i}^m P_j)}{\sqrt{3}U} \quad (3)$$

式中, U 为风电场公共连接点的电压; Z_i 为第 i 段集电线路阻抗; P_j 为第 j 台风电机组的输出功率。

由于风电场单回电缆集电线路在100 km以下, π 形等效电路下可忽略电导 G , 将线路阻抗影响集中起来, 并将线路对地电容对称地集中在线路的两端, 由于线路 U_1 、 U_2 端电压变化较小, 令 $U_1 = U_2$, 则损耗为^[11]

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{JD}} = 3I^2 R + \Delta P_{\text{wj}} \\ \Delta Q_{\text{JD}} = 3I^2 X - \left(\frac{1}{2}BU_1^2 + \frac{1}{2}BU_2^2\right) = 3I^2 X - BU_1^2 \end{cases} \quad (4)$$

由于风电场单回架空集电线路在100 km以下, 且电压为35 kV及以下, π 形等效电路下可忽略电导 G 和电纳 B , 将线路阻抗影响集中起来, 则损耗为

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{JD}} = 3I^2 R + \Delta P_{\text{yp}} \\ \Delta Q_{\text{JD}} = 3I^2 X \end{cases} \quad (5)$$

式中, I 为集电线路上的电流, $I = P_{\text{out}}/(\sqrt{3}U_N)$, 为风机箱式变压器输出功率, U_N 为线路对应的额定电压; ΔP_{JD} 、 ΔQ_{JD} 分别为单端线路的有功功率损耗和无功功率损耗; R 、 X 分别为线路电阻和电抗; G 、 B 分别为线路的电导和电纳; U_1 、 U_2 分别为线路两端电压; ΔP_{wj} 为电缆介质损耗, 一般由厂家资料提供; ΔP_{yp} 为架空线年平均电晕损耗, 一般取线路损耗的2%^[12]。

根据图2、式(4)可得, 所有 i 条电缆集电线路的电能为

$$\begin{cases} W_{P_{\text{JD}}} = \sum_{i=1}^i \sum_{m=1}^m (3I_{im}^2 R_{im} + \Delta P_{\text{wj}}) T_{im} \\ W_{Q_{\text{JD}}} = \sum_{i=1}^i \sum_{m=1}^m 3I_{im}^2 X_{im} T_{im} - \sum_{i=1}^i \sum_{m=1}^m B_{im} U_{im}^2 T_{im} \end{cases} \quad (6)$$

根据图2、式(5)可得, 所有 i 条架空集电线路的电能为

$$\begin{cases} W_{P_{\text{JD}}} = \sum_{i=1}^i \sum_{m=1}^m (3I_{im}^2 R_{im} + \Delta P_{\text{yp}}) T_{im} \\ W_{Q_{\text{JD}}} = \sum_{i=1}^i \sum_{m=1}^m 3I_{im}^2 X_{im} T_{im} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $W_{P_{\text{JD}}}$ 、 $W_{Q_{\text{JD}}}$ 为集电线路的有功和无功损耗; T_{im} 为工作时间; 其他参数参照式(5)中参数含义。

3.3 风机至箱式变电站的电能损耗

每台风机至箱式变压器采用的是地埋电缆, 可参见式(6)计算。

3.4 无功补偿装置电能损耗

现运行风电场的无功补偿方式大致分为三类: FC、SVC及SVG^[13]。

无功补偿装置FC均为常年挂网。其电能损耗表达式为^[14]

$$\Delta W_{\text{FC}} \approx (\Delta P_{\text{Le}} + I_{\text{FC}}^2 R_{\text{FC}}) T \approx (\Delta P_{\text{Le}} + Q_C \tan \delta) T \quad (8)$$

式中, ΔW_{FC} 为FC电能损耗; Q_C 为电容容量; ΔP_{Le} 为FC中电感额定电压下的功率损耗; R_{FC} 为电感等效电阻; I_{FC} 为流过FC的电流; δ 与电容器介质损耗有关; T 为工作时间。

静止无功补偿装置SVC主要由电感和电容器并联组成, 有功功率损耗为

$$\begin{aligned}\Delta W_{\text{SVC}} &= (\Delta P_{\text{FC}} + \Delta P_{\text{XLe}})T \\ &= (I_{\text{FC}}^2 R_{\text{FC}} + \Delta P_{\text{XLe}} \left(\frac{U}{U_{\text{N}}} \right)^2)T \quad (9) \\ &\approx (Q_{\text{FC}} \tan \delta + \Delta P_{\text{XLe}})T\end{aligned}$$

式中, ΔW_{SVC} 为SVC电能损耗; Q_{C} 为电容容量; ΔP_{Le} 为FC中电感额定电压下的功率损耗; R_{FC} 为电感等效电阻; ΔP_{XLe} 为电抗器消耗功率及晶闸管消耗功率。

静止无功发生器SVG常有三种方案:半桥串联三电平、功率单元并联变压器重化及链式直挂方案。对于并联变压器多重化方案需考虑并联变压器损耗,电能损耗公式为

$$\begin{cases} \Delta W_{\text{P}_{\text{SVG}}} = (\Delta P_{\text{SVG}} + \Delta P_{\text{SVGT}})T \\ \Delta W_{\text{Q}_{\text{SVG}}} = \Delta Q_{\text{SVGT}}T \end{cases} \quad (10)$$

式中, $W_{\text{P}_{\text{SVG}}}$ 、 $\Delta W_{\text{Q}_{\text{SVG}}}$ 为SVG电能有功、无功损耗; ΔP_{SVG} 为SVG本体单元功率损耗; ΔP_{SVGT} 、 ΔQ_{SVGT} 为变压器有功、无功损耗。

3.5 站用电主要负载统计表

站用变压器损耗参照主变压器损耗公式(1)进行估算。站用负载在实际运行中,变电站站内装有电能表,可从电能表中抄录用电量。在输变电工程估算时,可参照中国南方电网Q/CSG 11301—2008《线损理论计算技术标准》,按50%的站用变容量与计算时段之积计算用电量,具体计算时需根据风电场所在地环境温度、站区配套设施确定。站用变压器容量可参照电力规范DL/T 5155—2002计算。

4 工程算例

湖北某风电场,风场内1[#]测风塔70 m高度处的年平均风速为6.4 m/s,风电场总装机容量48 MW,采用24台单机2 000 kW双馈异步风力发电机组,叶轮直径105 m,轮毂高度80 m。每台风机至箱变电缆型号为YJV-1-3×240,并联6根;等电位电缆型号为YJV-1-1×240,并联2根,每根长度为25 m。

35 kV箱变变压器型号为S11-M-2 200/35,

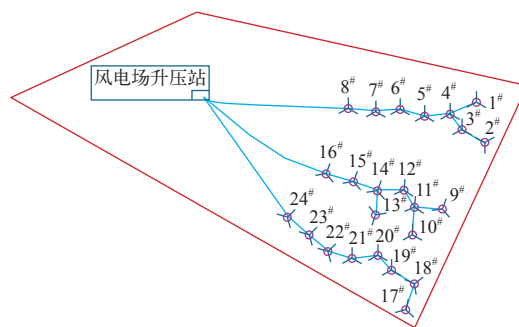
36.75±2×2.5%/0.69 kV, Dyn11;风电场主变压器型号为SZ11-5 000/110, 115±8×1.25%/36.75 kV, YNd11;风电场接地变压器型号为DKSC-800/36.75, 36.75±2×2.5%/0.4 kV, 电阻器为50 Ω;站用变压器型号为SC-250/35, 36.75±2×2.5%/0.4 kV, Dyn11。

风电场无功补偿装置采用SVG(6 Mvar)和FC(4 Mvar), SVG采用并联变压器型。

风电场场区风机布置、集电线路(采用地理敷设方式)如图4所示,其中ZRC-YJV22-35-3×70共计6 km; ZRC-YJV22-35-3×95共计0.9 km; ZRC-YJV22-35-3×150共计1.4 km; ZRC-YJV22-35-3×185共计1.4 km; ZRC-YJV22-35-3×240共计9 km。

通过基于流体力学计算方法(CFD)的风资源软件Metodyn WT,计算得到3条集电线路上的24台风机点位的功率年时间序列,如图5所示。

考虑到风电场存在不同程度的湍流、控制及偏航、叶片污染、风机可利用率、风机功率曲线及其他不确定性因素折减,这些因素应在风力发电机输出电能之前予以考虑,本风电场以上因素折减拟取0.72,风机出口年发电量为116 590 320 kW·h,等效满负载小时为2 429 h。根据以上分析可知,数据量很大,为计算方便,运用数学软件Matlab编程计算风电场的损耗。计算结果如下表所示,按计算的场用电2.86%折减后满发小时为2 359 h,较符合周边风电场2.8%~3.0%的场用电运行情况。风力发电机组出口总发电量及风电场电能损耗时间序列如图6所示,其中Pfj为风机出口总发电量时间序列,DeltaP为风电场电能损耗时间序列,



(a) 场区风机布置

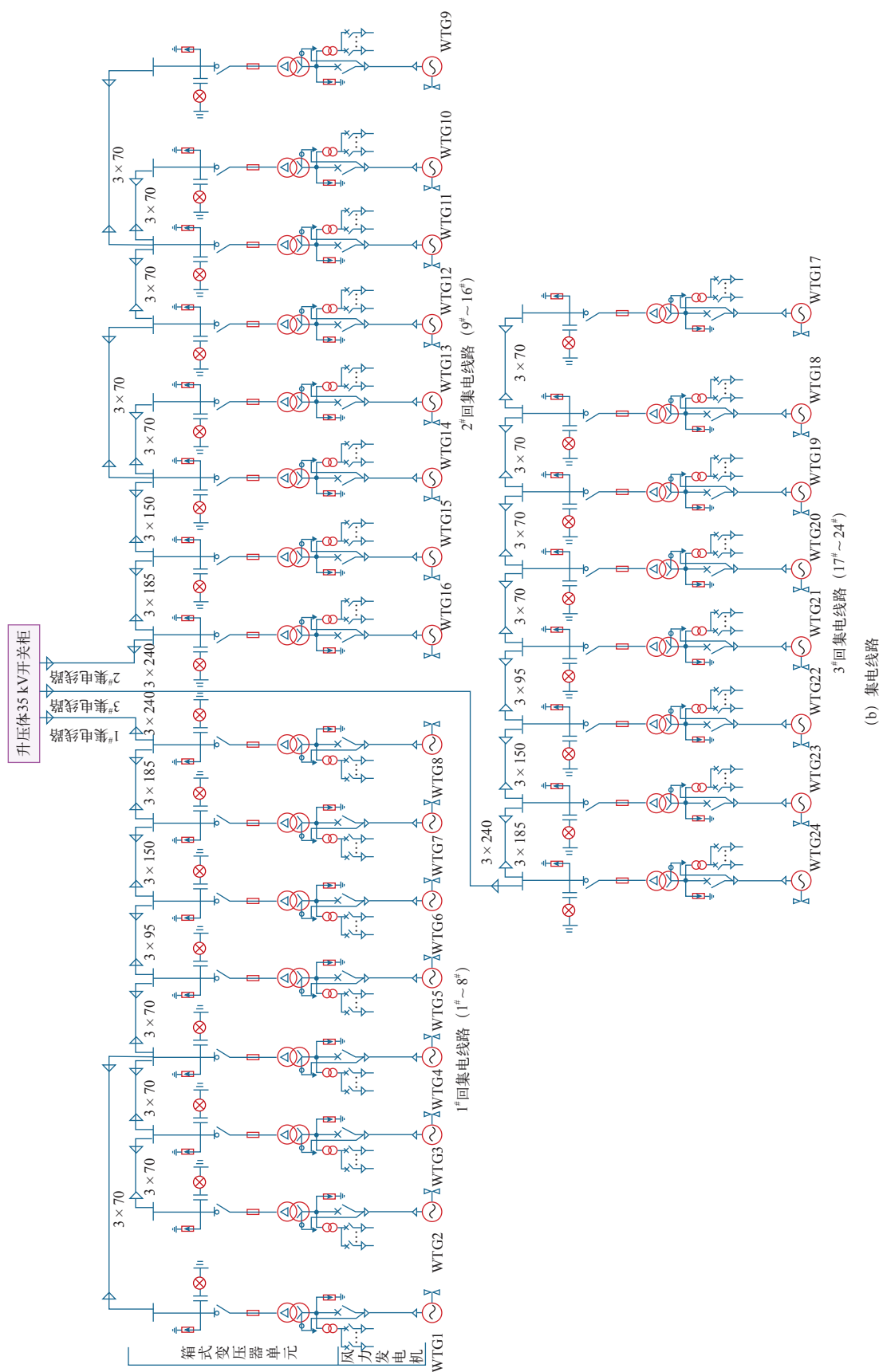


图4 风电场总平面布置及集电线

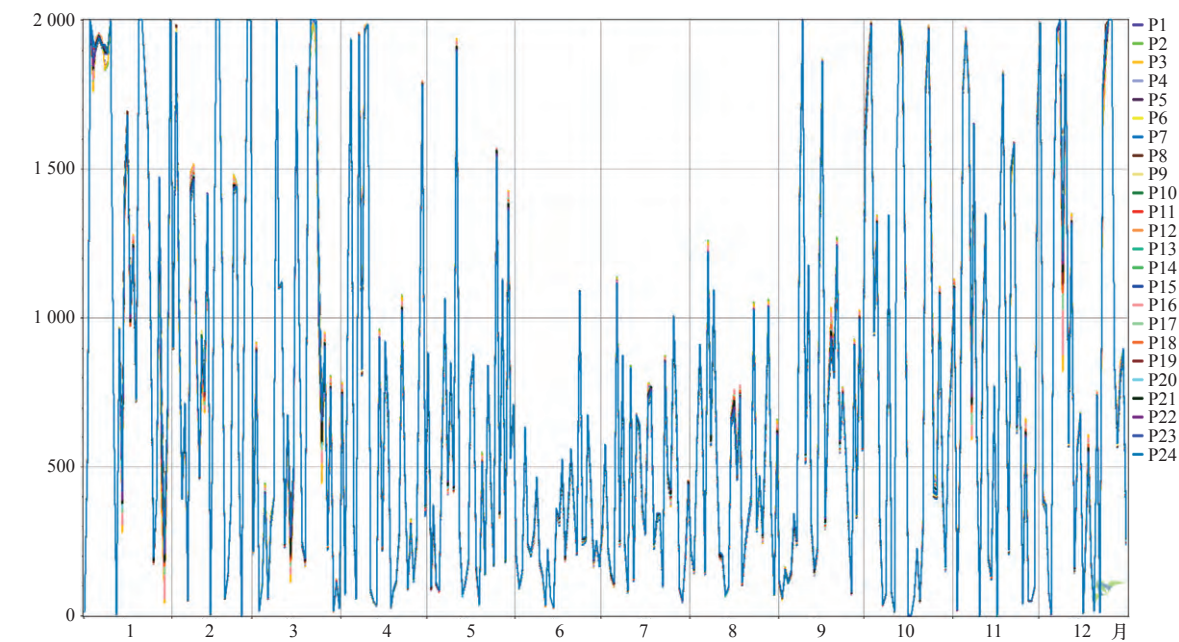


图5 1#~24#风机功率年时间序列

表 风电场电能损耗

损耗项目	年有功耗电量/kW·h	年有功耗电量比例(%)	年无功耗电量/kvar·h	年无功耗电量比例(%)
风机辅助变压器年总损耗	131 400	0.11	50 107	0.04
风机至箱变电缆年总损耗	99 235	0.09	94 872	0.08
箱变年总损耗	1 147 317	0.98	10 560 440	9.06
集电线路年总损耗	301 746	0.26	241 347	0.21
主变年总损耗	534 626	0.46	9 850 171	8.45
无功补偿装置年总损耗	166 122	0.14	520 821	0.45
站用变年总损耗	944 328	0.81	370 110	0.32
接地变年总损耗	10 775	0.01	192 720	0.17
年总损耗	3 335 549	2.86	21 880 588	18.77

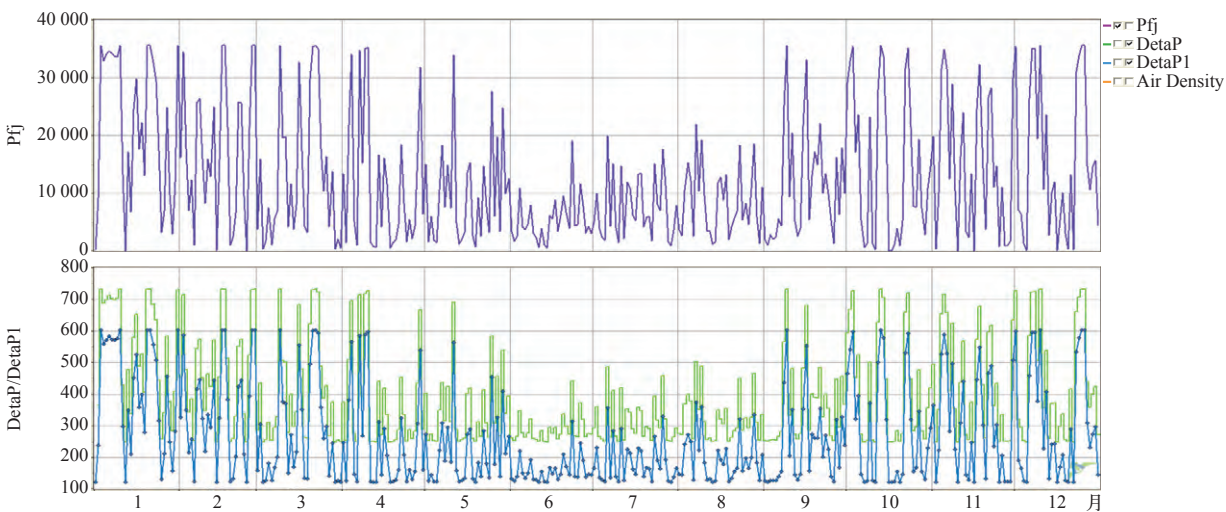


图6 风电场发电量与电能损耗时间序列

DetaP1为不计站用电、无功补偿和接地变损耗后的风电场电能损耗时间序列。从图6可以看出,风电场电能损耗具有与风电场风机输出功率的相关性和一致性。鉴于篇幅有限,本文不再列举其他算例。

5 结束语

本文借助风资源评估软件Meteodyn WT模拟计算了风电场各风机的功率时间序列,结合各个耗能设备电特性建立了风电场电能损耗计算模型,并运用数学软件Matlab比较准确地计算出整个风电场的电能损耗。根据对算例的分析,风电场电能损耗主要与箱变压器、集电线路、主变压器及站用电消耗有关,风电场电能损耗一般在2.5%~4%之间。另外可以从计算的结果看出,在考虑电网正常情况时,风机(工作在单位功率因数)在最优控制下,如需满足本场的无功需求,除风机外的场区设备,无功发生装置至少需提供风电场容量20%左右的无功功率,具体视工程而定,鉴于篇幅有限,本文不再列举其他算例。

本文中的方法可推广至前期或可行性研究阶段所有待建的项目中,可较为准确地计算出风电场的总电能损耗,对于评估风电场的经济效益有着很好的参考依据。

参考文献

[1] 邹金,赖旭,汪宁渤. 风电随机出力的时间序列模型[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2416-2421.

[2] Lun Y F I, Lam J C. A study of weibull parameters using long-term wind observations [J]. Renewable Energy, 2000 (20): 145-53.

[3] Chen P, Pedersen T, Bak-Jensen B, et al. Arima-based time series model of stochastic wind power generation [J]. IEEE Transactions on Power

Systems, 2010, 25 (2): 667-676.

[4] Alexiadis M C, Dokopoulos P S, Sah-Samanoglou H S, et al. Wind speed and power forecasting based on spatial correlation models [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14 (3): 836-842.

[5] 冯长青,杜燕军,包紫光,等. 风能资源评估软件WAsP和WT的适用性 [J]. 中国电力, 2010, 43 (1): 61-65.

[6] 代元军,汪建文,温彩凤,等. 利用WAsP软件对风力机发电量的预测 [J]. 可再生能源, 2011, 2 (29): 103-106.

[7] 贾俊川,刘晋,张一工. 双馈风力发电系统的新型无功优化控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (30): 87-92.

[8] Yamamoto M, Motoyoshi O. Active and reactive power control for doubly-fed wound rotor induction generator [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1991, 6 (30): 624-629.

[9] 郭春杰,袁越,邹文仲,等. 电网故障下直驱永磁风力发电机的无功功率控制策略 [J]. 电网与清洁能源, 2012, 28 (9): 73-78.

[10] 周先哲,古智鹏,黄雯. 变压器损耗计算方法的研究 [J]. 电力需求侧管理, 2013, 6 (15): 11-14.

[11] 谭伦农,张保会. 输电线路无功充电功率导致损耗的分摊问题 [J]. 电网技术, 2003, 27 (7): 59-63.

[12] 广东电网公司. 线损理论计算原理与应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[13] 夏祖华,沈斐,胡爱军,等. 动态无功补偿技术应用综述 [J]. 电力设备, 2004, 5 (10): 27-31.

[14] 梁家兴. 浅析220 kV输变电工程电能损耗估算 [J]. 能源与节能, 2014 (2): 1-3.

(收稿日期: 2015-04-13) **EA**

.....

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告