考虑风功率预测误差分布的储能功率与容量配置法

南晓强.李群湛

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要:针对正态分布与拉普拉斯分布用于拟合风功率预测误差较大的不足,采用分区拟合的思想对误差进 行分区,并在每个区间中应用β分布拟合后,加权求得全区域的误差分布函数。基于此,建立考虑预测误差分 布的风电场储能容量数学模型,其中储能容量表示为缺失容量的函数,并介绍储能容量、误差累计分布函数 与荷电状态的关系。提出一种新的系统容量缺额评价指标,用于比较储能容量优化效果。算例分析结果表 明,该方法可以在一定概率水平下平抑风功率预测误差带来的功率波动,同时降低对储能系统的要求。 关键词:风电场:分区拟合:β分布:预测:误差:评估指标:储能

中图分类号: TM 73: TM 614 文献标识码·A

引言 0

由于风能等可再生能源具有不稳定的特点,大 规模的可再生能源给电网带来了一定压力,给发电、 输电、配电和用电方也都提出了一定挑战。目前国内 外学者已经对风功率预测[12]进行了大量研究,主要 分为两大类:一类是直接对风功率进行预测:另一类 是通过风速预测求功率预测值。但现阶段小时级预 测误差平均水平也只有 20%~40%,有较大的提升 空间。

对预测误差的分析有利于弥补风功率预测水平 的不足,改善风功率输出特性。文献[3]根据概率分 布和最小二乘法的相关理论,提出了一种基于正态 分布的描述风电功率预测误差分布模型的新方法。 文献[4]考虑将正态分布与拉普拉斯分布的概率密 度函数相结合建立风电出力偏差的概率密度分布。 文献[5]基于大量实测数据的分析,发现可以采用带 移位因子与伸缩系数的 t 分布描述风电功率波动特 性的概率分布。文献[6]根据随机波动模型的峰度分 析技术,对风电时间序列存在明显的"肥尾"效应时 的条件分布进行了分析。

储能系统 ESS(Energy Storage Systems)是平抑 波动最理想的选择^[79]。由于风速的高度随机性,ESS 的研究大都集中于其暂态稳定性方面的分析[10-13],鲜 有对 ESS 的容量配置的研究[1416],或是仅通过简单 的试验来确定储能容量[17-19]。文献[20]就如何用最小 的 ESS 实现风电场长时间稳定输出进行了分析,对 风电机组中 ESS 的配置功率、配置容量的大小及其 对风电机组有功功率输出的优化作用进行了研究. 提出了以风电机组及储能装置的输出功率波动标准 差为指标的 ESS 的功率和容量优化方案。文献[21] 利用储能容量成本及风电场输出功率平滑效果辅助 判据,得出风电场储能容量合理的取值范围,使功率

波动达国标而不是全部平抑。

针对现有误差分布在计算方法或拟合效果上存 在的不同程度局限性,本文采用文献[22]分区拟合 的思想,将误差分区,在每个区间分别拟合后,加权 求和获得全区域的误差分布函数。在此基础上,对储 能容量的模型进行了分析,考虑了预测误差的影响, 将储能容量表示为缺失容量的函数,以在满足一定 概率水平下平抑风功率预测误差带来的功率波动. 降低 ESS 的投资。

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.11.021

预测误差分布 1

为更加详尽地分析预测误差的影响,须给出一 种合适的分布模型,用以较准确描述预测误差的分 布特性。文献[3-4]分析了拉普拉斯分布、标准正态 分布在预测误差拟合上的应用,虽在整体上能够表 示风电功率预测误差的趋势,但在部分区段上出现 严重不符,若直接利用其来表示实际数据的概率密 度分布情况,在一定程度上夸大了风电功率预测的 误差,从给出的拟合效果图可以看出在部分区间上 的局限性。文献[23]采用直接统计的方法对某地区 风电场风能的预测误差进行归类统计,发现风能预 测曲线中预测误差的大小与风能输出功率水平有 关,而与时间没有明显的关系,因此本文将对样本进 行纵向划分。另外,β分布在[0,1]区间具有良好的性 质,只需适当选择参数,*B*分布就可拟合各种区间序 列分布,曲线形状从均匀分布到近似正态分布、从对 称到不对称,尤其对于"偏峰"分布具有很强的建模 能力^[24]。因此,对于未知分布的数据,可以通过拟合 β分布参数来确定相应的数据处理结果,省去了判 别分布的麻烦。本文根据预测误差的分布特性,结合 β 分布的类似特性,来拟合区间风功率预测误差分布。

本文采用文献[22]分区建模的方法展开研究, 基本思路为:将风功率分割为 n 个区间,区间长度

收稿日期:2012-12-19:修回日期:2013-09-27

决定于试验数据的大小。运用β分布分别对每个区 间实测功率进行拟合后,减去区间平均预测功率, 最后进行求和运算,得到预测误差的整体分布。进行 预测误差分析的具体过程如下^[22],文中P为功率有 名值,p为相应功率标幺值。

a. 应用 β 分布计算单个区间*i*的实测功率分布 函数 $f_i(p)$,可表示为:

$$f_i(p) = \frac{p^{\alpha - 1}(1 - p)^{\beta - 1}}{\int_0^1 p^{\alpha - 1}(1 - p)^{\beta - 1} dp} \quad i = 1, 2, \cdots, n$$
(1)

其中,p为区间i的实测功率值; α 、 β 为分布参数,与 区间功率的方差 σ^2 和均值 μ 有关,可表示为式(2)。

$$\sigma^{2} = \frac{\alpha\beta}{(\alpha+\beta+1)(\alpha+\beta)^{2}}$$

$$\mu = \frac{\alpha}{\alpha+\beta}$$
(2)

故有:

$$\begin{vmatrix} \alpha = \frac{(1-\mu)\mu^2}{\sigma^2} - \mu \\ \beta = \frac{1-\mu}{\mu} \alpha \end{aligned} (3)$$

b. 用 $f_i(p)$ 减去区间 i 的平均预测功率 $\bar{p}_{\text{pre},i}$,得 到该区间的预测误差分布函数 $f_i(\varepsilon)$ 。

c. 求取全区间分布函数。对各区间误差分布进 行求和运算,将得到全区间预测误差的分布函数 *f*(ε):

$$f(\varepsilon) = \sum_{i=1}^{n} \omega_i f_i(\varepsilon) \quad 0 \leq \omega_i \leq 1, \sum_{i=1}^{n} \omega_i = 1$$
(4)

其中, ω_i 为权重系数,取决于预测值出现在该区间的 概率统计值; $f_i(\varepsilon)$ 为分布于[-1,1]区间的 β 分布, 且 $f_i(\varepsilon) \ge 0$,故加权求和后不会出现正负相抵消的 情况。

上述过程采用了文献[22]分区建模的方法,将 风功率进行纵向分割,反映不同功率区间的预测水 平,且β分布具有较简单的表达形式,能够很好地拟 合预测误差分布,本文算例将对文献[22]分区建模 方法进行验证。f(ε)的获得,在风功率预测值的基础 上增加了预测误差的分布,为进一步掌握风功率波 动特性提供了方便,也为平抑风功率波动的研究提 供了所需条件。

2 储能容量

ESS 是平抑波动最理想的选择。为满足风电接 入后系统的安全、电力供需平衡、电能质量的要求, 借助 ESS 来抑制风电预测误差,可使原有的波动性、 间隙性变得"可控"。本节介绍一种用于评估储能容 量的概率方法,该方法将 ESS 容量表示为缺失容量 UE(Unserved Energy)的函数,UE 定义为 ESS 补偿 (吸收或输出)不足的量 E_{UE} ,亦可用所占风电装机总 量 $E_{W,total}$ 的百分比 e_u 表示,表达式如式(5)所示:

$$e_{\rm u} = \frac{E_{\rm UE}}{E_{\rm W, total}} \times 100\%$$
(5)

该方法的目的在于分析 ESS 在一定概率水平下 能够平抑风功率预测误差导致输出波动的能力。本 节将详细介绍 ESS 容量与误差累计分布函数 CDF (Cumulative Distribution Function)及荷电状态 SOC (State Of Charge)的关系。

2.1 ESS 功率的确定

ESS 应具有短时间快速响应负荷变化、补偿功率偏移的能力。由于目前储能成本较高,ESS 容量的配置变得尤为关键,因其将会影响到系统的工程造价。若 ESS 的额定功率 P_{ESS} 等于风电装机功率 $P_{W,inst}$,即 $p_{ESS} = P_{ESS} / P_{W,inst} = 1 p.u.,ESS 可以完全平抑风功率预测误差,但此时需要较大的储能容量。另外,对于现有预测方法,出现预测误差很大的概率非常小,因此,一般考虑在满足一定概率水平下减小储能容量,减少投资成本。$

在已知风功率预测误差分布 $f(\varepsilon)$ 的情况下,容量缺失量 e_{ω} 可表示为未能补偿的预测误差的积分量,表达式为:

$$e_{uP} = \frac{P_{\text{W,inst}}}{\overline{P}} \int_{p_{\text{ESS}}}^{1} f(\varepsilon) (\varepsilon - p_{\text{ESS}}) d\varepsilon$$
(6)

其中, P为风功率平均值; P_{W,inst}为风电场装机容量; e 为风功率预测误差; 积分式乘 P_{W,inst} / P 的目的是为 了方便表示 e_up 占 P_{W,inst} 的百分比。该式建立了储能 功率与容量缺失量之间的函数关系式。

2.2 ESS 容量的确定

ESS 容量关系的确定较功率的计算复杂得多, 需要分别对能量吞吐率(ETR)与充/放电饱和时间 t_{st}进行计算。

2.2.1 能量吞吐率的计算

能量吞吐率定义为能量吞吐量 E_{u} 与总发电量 $E_{w, total}$ 的比值, 如式(7)所示:

$$ETR = \frac{E_{tp}}{E_{W,total}}$$
(7)

其中, *E*_w是 ESS 充、放电容量的绝对值之和。本文考 虑充、放电量相等, 保持功率平衡的理想 ESS。理想 状况下的能量吞吐率可表示为:

$$ETR_{0} = \frac{\int |\boldsymbol{\varepsilon}(t)| dt}{\int p(t) dt} = \frac{|\boldsymbol{\overline{\varepsilon}}|}{\bar{p}}$$
(8)

其中, $|\overline{\epsilon}|$ 为风功率预测平均绝对误差; \overline{p} 为风功率 平均输出值。考虑到时间段相同,因此可以用 $|\overline{\epsilon}|$ 与 \overline{p} 代替 E_{In} 与 E_{Wineto}

2.2.2 充/放电饱和时间 tsu 的计算

将风功率预测误差值作为 ESS 的输入量,会得

到 ESS 的 SOC。SOC 标幺化处理方法见式(9):

$$SOC_{N} = \frac{SOC}{P_{W,inst}T}$$
 (9)

其中,*T* 为预测周期。SOC_N=1 p.u. 表示 ESS 充电至额 定状态。

可以通过 SOC_N 的累计概率密度函数 F_{soc} 计算 t_{sat} ,若 ESS 的容量减少为 e_x ,则:

$$t_{\rm sat} = 100 - F_{\rm SOC}(e_{\rm x})$$
 (10)

由于 *F*_{soc} 分布特性,有时通过式(10)的简单计算,并不能得到满意的值,更加有效的方法是其逆过程。因而 ESS 容量计算式为:

$$e_{\rm x} = F_{\rm SOC}^{-1}(100 - t_{\rm sat}) \tag{11}$$

其中, e_x 为与给定 t_{sat} 对应的ESS容量; F_{soc} 为 F_{soc} 的反函数。式(11)建立了充/放电饱和时间 t_{sat} 与ESS容量 e_x 的关系式。因此,可以借助SOC_N的累计概率密度函数 F_{soc} 求取 e_{xo}

2.2.3 函数关系的确定

前文介绍了 e_u 与 ESS 功率 P_{ESS} 、储能系统容量 E_{ESS} 的关系,其实在 E_{ESS} 减小的同时, P_{ESS} 也会变化。 可采用二维插值法来分析 E_{ESS} 与 P_{ESS} 同时减小时, e_u 的变化。

ETR₀ 表示 ESS 可以补偿所有功率波动时的能量吞吐率,当受某种约束使得 ESS 容量减少,缺失容量为 e_u 时的能量吞吐率为 ETR₀,则:

$$ETR'_{0} = ETR_{0} - e_{u}$$
(12)

$$e_{\rm u}(P_{\rm ESS}, E_{\rm ESS}) = \text{ETR}_0(1 - \text{etr}_0') \tag{13}$$

其中,etr₀=ETR₀/ETR₀为ETR₀的标幺值。至此,本 文完成了考虑风电预测误差的储能系统容量与缺失 量关系的分析,图1给出了储能缺失容量具体计算的 流程图,主要包括两大步骤:一是容量缺失量 $e_{u^{\rho}}$ 的 计算,主要与风功率预测误差分布函数 $f(\varepsilon)$ 有关;二 是容量缺失量 $e_{u^{\varepsilon}}(E_{UE}$ 的标幺值)的计算,需分别计 算SOC_N的累计概率密度函数 F_{SOC} 及能量吞吐率 ETR₀。结合上述2步可建立 e_{u} 与 P_{ESS} 、 E_{ESS} 的关系, 可根据容量缺失量,获得所需储能系统的容量配置。



图 1 頃能缺失谷重订昇流程 Fig.1 Flowchart of capacity deficiency calculation

3 评估指标

由于风功率波动的影响,在储能容量减少的情

况下,系统可能出现容量缺额(ES)现象。当风功率波 动值大于储能容量,或波动变化率大于 ESS 充/放电 速率时,系统无法提供足够功率时均会出现功率缺 额现象。本节提出一种储能容量优化(减少)前后系 统容量缺额评估指标,定义为:

$$k = \frac{\text{ES}'}{\text{ES}_0} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \text{ES}'(t)}{\sum_{i=1}^{H} \text{ES}_0(t)}$$
(14)

其中,k 为容量缺额评估指标; ES_0 、ES'分别为优化 $前、后系统容量缺额;H 为评估周期;<math>ES_0(t)$ 、ES'(t)分别为t时刻优化前、后系统容量缺额。容量缺额受 风功率变化率 $\Delta P_W = |P_{Wb} - P_{Wa}| / \Delta t$ 、ESS 充/放电速 率 P_E 及 SOC 等很多因素的影响,如图 2 所示。



图 2 容量缺额评价指标

Fig.2 Evaluation index for capacity shortage

容量缺额 ES 的具体计算过程如下。

若初始荷电量大于等于风能波动量,即 SOC $\geq \Delta P_{w}$,则:

$$ES = \begin{cases} (\Delta P_{W} - P_{E}) \,\Delta t & P_{E} \leq \Delta P_{W} \\ 0 & P_{E} > \Delta P_{W} \end{cases}$$
(15)

若初始荷电量小于风能波动量,即SOC< ΔP_w ,则:

$$ES = \begin{cases} P_E \Delta t & P_E \leq \Delta P_W \\ \Delta P_W - SOC & P_E > \Delta P_W \end{cases}$$
(16)

4 算例分析

本文以某地风电场实测数据为研究对象,该数 据序列时间间隔为3s。采用先预测风速,再根据风 速-风功率关系得风功率预测值。取 2011 年 7 月份 数据,按每15min提取一个点作为原始数据建立模 型,预测下一时刻的风速。预测模型采用文献[1]提 出的组合预测模型。该模型采用时间序列和 BP 神经 网络的组合预测模型,其中 BP 模型的输入量由历史 数据和时间序列得到的残差值组成。设 v1 是 BP 神 经网络预测值, v_2 是 ARMA 预测值, v_0 是加权平均的 组合预测值,预测误差分别为 e₁,e₂ 和 e₀。组合预测 模型为: $v_0 = \omega_1 v_1 + \omega_2 v_2$,其中 $\omega_1 \ \omega_2$ 是相应的权重,且 $\omega_1 + \omega_2 = 1$,误差为 $e_0 = \omega_1 e_1 + \omega_2 e_2$ 。由组合预测模型 得到预测值 vo 后,求其相对的风功率预测值,再与 实测值比较,得到误差量。该组合预测方法所得结果 较单一预测方法更令人满意,具有一定的实用价值。 应用第1节介绍的分区建模的方法,将本文算 例功率区间划分为50个区间,图3只给出了5个区间(0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 p.u.为5个区间的分割点)的 $f_i(p)$ 的仿真波形,每个区间均为一个具有不同分布参数的 β 分布函数。表1给出这5个区间的权重系数, ω_i 取为预测值出现在区间*i*的概率统计值。用 $f_i(p)$ 减去区间*i*平均预测功率 $\bar{p}_{pre,i}$,得到该区间的预测误差分布函数 $f_i(\varepsilon)$,仿真波形如图4所示,图中 ε 为标幺值,后同。值得说明的是,本文算例中,将风功率区间等分为50份,对每个区间进行拟合,并计算其权重系数,经求和后获得整个区间的误差分布。整个区间的划分份数会影响最后的拟合精度,若未达到要求精度,可增加区间数目。

120



图 3 风功率区间概率密度函数 Fig.3 Partitioned probability density function of wind power

表1 权重系数的取值



图 4 风功率误差区间概率密度函数 Fig.4 Partitioned probability density function of wind power prediction error

最后,由式(4)求取全区间分布函数。f(ε)为分 布在-100%~100%之间的函数,为能更清楚地看到 本文所提分区方法在整个区间上的有效性,图 5(a) 中只给出 0~100%之间风功率预测误差的概率密 度分布曲线图,-100%~0之间的分布可类似得出。 为对比分析,同时绘制了由历史实测数据计算的误 差分布曲线,图 5(a)给出本文分区拟合的效果,图 5(b)给出文献[4]中提到的拉普拉斯与正态分布的 拟合效果,从变化趋势与跟随效果上看,特别是在误 差分布的"肥尾"特性上,本文采用的分区拟合方法 都有较好的效果。通过算例验证了文献[22]提出的 分区拟合方法的有效性,为进一步分析储能模型提 供了所需条件。

根据得到的风功率误差分布,由式(6)仿真计算,得到 press 随 eup 的变化曲线图,如图 6 所示。从图



图 6 ESS 额定功率与容量缺失量的函数关系 Fig.6 Functional relationship between nominal power and capacity deficiency of ESS

中可以根据容量缺失量,得到对应所需 ESS 的功率。 在本文仿真分析工况下, p_{ESS} 随 $e_{u\rho}$ 的变化幅度非常 大,特别是在 $e_{u\rho}\epsilon(0,1.5\%)$ 的区间内, p_{ESS} 甚至出现 了直线下降的现象,由 1 p.u. 迅速减小到 0.4 p.u.。因 此,出于经济性与实用性考虑,适量地增加 $e_{u\rho}$,可以 减弱对 ESS 的苛刻要求。

图 7 给出了由 SOC 的累计密度曲线求取 ESS 容量的过程,图中 SOC 为标幺值,实线部分为累计 概率密度函数 F_{SOC} 的变化曲线,(100 – t_{sat})与曲线交 点的横坐标值便为 $F_{SOC}^{-1}(100 - t_{sat})$,图中取 $t_{sat} = 20\%$,可由 F_{SOC}^{-1} 求得 $e_x = 0.38$,为建立缺失量与储能容量函 数关系建立基础。

至此,算例介绍了风功率预测误差建模的完整 过程,并基于此得到了 press 随 eur 的变化曲线图,给



出了由 SOC 的累计密度曲线求取 ESS 容量的过程。 从仿真结果可以看出,本文提出的分区拟合方法都有 较好的效果;eup的提出可以减弱对 ESS 的苛刻要求。

5 结论

本文在对风功率预测误差分析的基础上,提出 一种用于评估储能容量的概率方法,主要结论如下。

a. 采用分区拟合的思想,将风功率误差区间分 成若干小区间后,在每个区间中应用β分布拟合,最 后加权求和获得全区域的误差分布函数。仿真结果 验证了分区拟合方法的正确性。

b. 介绍了一种用于评估储能容量的概率方法, 该方法将 ESS 容量表示为缺失容量的函数,目的在 于分析 ESS 在一定概率水平下能够平抑风功率预测 误差导致输出波动的能力,同时减少对 ESS 的要求, 并详细介绍 ESS 容量与误差累计分布函数、SOC 的 关系。

c. 最后提出一种新的容量缺额指标。

参考文献:

- NAN Xiaoqiang,LI Qunzhan,QIU Daqiang,et al. Short-term wind speed syntheses correcting forecasting model and its application [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2013,49:264-268.
- [2] ALEXIADIS M C, DOKOPOULOS P S, SAHSAMANOGLOU H S. Wind speed and power forecasting based on spatial models [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3):836-842.

[3] 刘斌,周京阳,周海明,等.一种改进的风电功率预测误差分布模型[J]. 华东电力,2012,40(2):286-290.

LIU Bin,ZHOU Jingyang,ZHOU Haiming, et al. An improved model for wind power forecast error distribution[J]. East China Electric Power,2012,40(2):286-290.

[4] 葛炬,王飞,张粒子. 含风电场电力系统旋转备用获取模型[J]. 电力系统自动化,2010,34(6):32-36.
 GE Ju,WANG Fei,ZHANG Lizi. Spinning reserve model in the wind power integrated power system[J]. Automation of Electric

Power Systems, 2010, 34(6): 32-36.

- [5] 林卫星,文劲宇,艾小猛,等.风电功率波动特性的概率分布研究
 [J].中国电机工程学报,2012,32(1):38-46.
 LIN Weixing,WEN Jinyu,AI Xiaomeng, et al. Probability density function of wind power variations[J]. Proceedings of the CSEE, 2012,32(1):38-46.
- [6] 陈昊,张建忠,王玉荣. 基于 SV 模型的风速时间序列峰度分析[J]. 中国电力,2011,44(1):90-93.
 CHEN Hao,ZHANG Jianzhong,WANG Yurong. Kurtosis analysis of wind speed time series based on SV model[J]. Electric Power, 2011,44(1):90-93.
- [7] ABBEY C,STRUNZ K,JOOS G. A knowledge-based approach for control of two-level energy storage for wind energy systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2009,24(2):539-547.
- [8] YAO D L, CHOI S S, TSENG K J, et al. A statistical approach to the design of a dispatchable wind power-battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009,

24(4):916-925.

- [9] BREKKEN T K A, YOKOCHI A, von JOUANNE A, et al. Optimal energy storage sizing and control for wind power applications[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(1): 69-77.
- [10] TAGUCHI A, IMAYOSHI T, NAGAFUCHI T, et al. A study of SMES control logic for power system stabilization[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2):2343-2346.
- [11] DECHANUPAPRITTHA S,HONESOMBUT K,WATANABE M, et al. Stabilization of tie-line power flow by robust SMES controller for interconnected power system with wind farms [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity,2007,17(2): 2365-2368.
- [12] 梁亮,李建林,惠东.大型风电场用储能装置容量的优化配置[J]. 高电压技术,2011,37(4):930-936.
 LIANG Liang,LI Jianlin,HUI Dong. Optimization configuration for capacity of energy storage system in large-scale wind farm [J]. High Voltage Engineering,2011,37(4):930-936.
- [13] 金海峰,吴涛.风电接入系统后的电压稳定问题[J].电力自动 化设备,2010,30(9):82-84.
 JIN Haifeng,WU Tao. Voltage stability after grid-connection of wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30 (9):82-84.
- [14] ANSTINE L T,BURKE R E,CASEY J E,et al. Application of probability methods to the determination of spinning reserve requirements for the Pennsylvania-New Jersey-Maryland interconnection[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1963,82(68):726-735.
- [15] LEE S T, YAMAYEE Z A. Load-following and spinning-reserve penalties for intermittent generation [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(3):1203-1211.
- [16] ORTEGA-VAZQUEZ M A,KIRSCHEN D S. Optimizing the spinning reserve requirements using a cost/benefit analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1):24-33.
- [17] ORTEGA-VAZQUEZ M A,KIRSCHEN D S. Estimating the spinning reserve requirements in systems with significant wind power generation penetration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1):114-124.
- [18] da SILVA A M LL,SALES W S,da FONSECA M L A,et al. Long-term probabilistic evaluation of operating reserve requirements with renewable sources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1):106-116.
- [19] HARTMANN B,DAN A. Cooperation of a grid-connected wind farm and an energy storage unit-demonstration of a simulation tool[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(1): 49-56.
- [20] 文艺,张步涵,毛承雄,等.风电场中储能系统的功率和容量优 化配置[J].湖北工业大学学报,2012,27(1):18-21.
 WEN Yi,ZHANG Buhan,MAO Chengxiong, et al. The power and capacity's optimized allocation of energy storage device in wind farm[J]. Journal of Hubei University of Technology,2012, 27(1):18-21.
- [21] 卢继平,朱三立,韩涛,等.风电场储能容量合理取值范围分析[J].重庆大学学报,2010,33(8):46-51.

LU Jiping,ZHU Sanli,HAN Tao,et al. Analysis of reasonable wind farm energy storage capacity range[J]. Journal of Chongqing University,2010,33(8):46-51.

- [22] BLUDSZUWEIT H, DOMINGUEZ-NAVARRO J A, LLOMBART A. Statistical analysis of wind power forecast error[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3):983-991.
- [23] 孟祥星,王宏. 大规模风电并网条件下的电力系统调度[J]. 东 北电力大学学报,2009,29(1):1-7.

MENG Xiangxing, WANG Hong. Electric system scheduling in the condition of synchronization of large-scale wind power[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2009, 29(1):1-7.

[24] 李筠,祝勇. 数据处理的 Beta 分布拟合法[J]. 仪器仪表学报, 2004,25(4):762-763.

LI Yun, ZHU Yong. Analysis of beta distribution in data pro-

cessing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25
(4):762-763.

作者简介:

南晓强(1985-),男,山西灵石人,博士研究生,主要从事 电力系统稳定性、新能源发电及并网技术方向的研究(E-mail: nanxiaoqiang6@163.com);

李群湛(1957-),男,河北元氏人,教授,博士研究生导师,主要从事供电理论、电能质量与控制等方面的教学与研究工作。

Energy storage power and capacity allocation based on wind power forecasting error distribution

NAN Xiaoqiang, LI Qunzhan

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Since the normal distribution or Laplace distribution could not fit the forecasting error of wind power properly, the partitioned fitting method is applied, which partitions the error, adopts the β distribution to fit it for each section and calculates the distribution function of forecasting error covering the whole region by weighted summation. With the consideration of forecasting error distribution, a mathematic model of wind farm energy storage capacity is built, in which, the energy storage capacity is represented by the function of capacity deficiency. The relationship among energy storage capacity, error cumulative distribution function and charging state are introduced. An index is proposed for evaluating the system capacity shortage, with which the effect of energy storage capacity optimization is compared. Results of case analysis show that, the power fluctuation caused by the wind power forecasting error is restrained in a certain probability level and the requirement for energy storage system is mitigated.

Key words: wind farms; partitioned fitting; β distribution; forecasting; errors; evaluation index; energy storage

(上接第 116 页 continued from page 116)

Method for analyzing frequency-domain characteristics of step function in rectangular time window

LI Jun, WAN Wenjun, LIU Zhigang

(Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Company, Guangzhou 510080, China)

Abstract: The time window factor may easily influence Fourier transform algorithm in the frequency-domain analysis of nonperiodic signal, resulting in spectrum leakage. A method based on *LCR* point frequency filter with simpler algorithm is applied to analyze the rectangular time window factor and the conclusion is that, only a narrow low-frequency part of step signal is affected and the affected part decreases along with the increase of time window length. The amplitude-frequency characteristic of an inertial section is analyzed with the proposed method and its result is very close to that of theoretic amplitude-frequency characteristic analysis. The frequency-domain characteristics of an object in the second-stage superheated steam temperature control of boiler are identified by the proposed method.

Key words: Fourier transform; step signal; frequency-domain analysis; *LCR* point frequency filter; rectangular time window

122