

基于统计理论的含风电互联电网 CPS 研究

翁毅选¹, 邓长虹¹, 黄文涛¹, 肖永², 颜霞², 赵维兴²

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 贵州电网公司, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 从统计学原理的角度研究了风电对我国互联电网 CPS(Control Performance Standard)考核指标的影响机理。利用关键变量的数学期望对传统 CPS 计算公式进行变换, 推导了用于定量分析的 CPS 考核指标计算公式。利用 MATLAB/Simulink 建立两区域互联电网模型, 仿真结果表明对 CPS 指标影响程度由低到高排列分别为正态分布、 t 分布、威布尔分布; 随着风电并网容量持续增大, 互联电网 CPS 考核指标的降低幅度也越大。

关键词: 统计学; 风电; CPS 考核指标; 互联电网; 控制

中图分类号: TM 732; TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.12.013

0 引言

针对互联电网正常运行情况的频率控制性能, 美国电力可靠性委员会(NERC)提出了基于严密统计学原理的 CPS(Control Performance Standard)考核标准^[1], 但其主要是对含常规可控电源的互联电网频率控制性能进行评价, 并没有考虑风电等不可控电源的影响。随着风电并网容量的持续增加, 其固有的随机性和不确定性会导致系统有功频率的波动, 这将给系统的频率控制带来极大的挑战^[24]。而 CPS 作为衡量互联电网频率控制性能的关键指标, 将会直接反映出风电接入以后对系统频率控制性能的影响, 对风电并网以后的 CPS 的研究具有理论价值和实际意义。

当前关于风电接入电网后的 CPS 研究内容较少, 国内外对 CPS 的研究主要围绕以下 2 个方面: 基于 CPS 的自动发电控制(AGC)策略, 即研究适用于 AGC 的 CPS 考核逻辑, 完善系统的 AGC 性能^[5-7]; 探讨 CPS 的理论机理, 如文献[8]分析 CPS 统计特性和物理特性, 阐述了 CPS 的数学原理, 文献[9]从理论机理上分析了 CPS 与其他评价标准之间的关系。

本文结合 CPS 的统计学原理, 对风电并网后 CPS 考核指标的变化特性进行了深入研究, 给出了详细的理论分析和公式推导, 明确了 CPS 考核指标随风电并网容量的变化趋势。最后以一个两区域互联电网为例进行仿真分析, 定量评估了风电接入不同容量区域下的 CPS 指标变化特性, 同理论分析相印证。同时给出了风电不同的分布特性对 CPS 指标的仿真分析。

1 CPS

1.1 CPS1

CPS1 主要是用来衡量区域控制偏差(ACE)对频

率偏差恢复的贡献作用, CPS1 考核指标通常是 1 min 计算一次, 然后以一个平行移动年作为周期求取平均值^[10-12], 并要求有下式成立:

$$\text{AVG}_{1\text{-year}} \left(\frac{\text{ACE}_{1\text{min}} - \Delta f_{1\text{min}}}{-10B} \right) \leq \varepsilon_1^2 \quad (1)$$

其中, $\text{AVG}_{1\text{-year}}(\cdot)$ 为以 1 a 为周期求平均值; $\text{ACE}_{1\text{min}}$ 为控制区域 1 min 的区域控制偏差滚动平均值; $\Delta f_{1\text{min}}$ 为控制区域 1 min 频率偏差的滚动平均值; B 为控制区域的频率偏差系数(负数); ε_1 为互联电网对全年 1 min 频率平均偏差的均方根的控制目标值, 互联电网中, 各个控制区域的 ε_1 均相同。

CPS1 考核指标的计算公式为:

$$\text{CF}_{1\text{min}} = \frac{\text{ACE}_{1\text{min}} - \Delta f_{1\text{min}}}{-10B - \varepsilon_1^2} \quad (2)$$

$$\text{CF}_{1\text{-year}} = \text{AVG}_{1\text{-year}}(\text{CF}_{1\text{min}}) \quad (3)$$

$$\text{CPS1} = (2 - \text{CF}_{1\text{-year}}) \times 100\% \quad (4)$$

其中, $\text{CF}_{1\text{min}}$ 为 1 min 服从因数; $\text{CF}_{1\text{-year}}$ 为 1 a 的服从因数, 根据 CPS1 考核标准, 要求有 $\text{CPS1} \geq 100\%$, 因此有 $\text{CF}_{1\text{-year}} \leq 1$ 。

1.2 CPS2

CPS2 主要侧重于功率控制, 要求每 10 min 的区域控制偏差平均值在规定的范围 L_{10} 以内^[10-12], 如下式所示:

$$\begin{aligned} |\text{ACE}_{10\text{min}}| &\leq L_{10} \\ L_{10} &= 1.65\varepsilon_{10} \sqrt{(-10B_i)(-10B_s)} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\text{ACE}_{10\text{min}}$ 为 10 min 的区域控制偏差平均值; B_i 为控制区域 i 的频率偏差系数; B_s 为整个互联电网的频率偏差系数, 即各控制区域中的频率偏差系数总和; ε_{10} 为互联电网对全年 10 min 频率平均偏差均方根的控制目标值。

CPS2 考核指标的计算公式为:

$$\text{CPS2} = \frac{N(|\text{ACE}_{10\text{min}}| \leq L_{10})}{N_T(\text{ACE}_{10\text{min}})} \times 100\% \quad (6)$$

其中, $N(|\text{ACE}_{10\text{min}}| \leq L_{10})$ 为规定的统计时间内区域

控制偏差的 10 min 平均值满足式(5)的采样点数; $N_T(ACE_{10min})$ 为规定的统计时间内的总采样点数。根据 CPS2 的考核标准,要求 $CPS2 \geq 90\%$ 。

2 风电并网后对频率控制的影响

风电机组原则上具备参与系统一次调频的能力,且国外关于此方面的实例研究已取得了一定成果^[13-15],在我国,受能源政策主导,总体上仍然以风电的最大化输出和利用为目标^[16-17],国内风电机组基本上不参与实际系统调频。随着风电装机容量的不断增加,其逐步代替了部分具有调频能力的常规机组以后,将会对整个系统的调频能力产生重要影响,本文立足于国内风电发展现状,探讨了风电并网后对系统频率的影响。

2.1 风电并网后对系统自然频率特性系数的影响

假设系统额定总有功负荷为 P_{LN} ,系统发电机组总额定容量为 P_{CN} ,当风电没有接入电网时,根据电力系统的频率静态特性可知:

$$\beta = K_C + K_L \quad (7)$$

其中, β 为系统的自然频率特性系数, K_C 为发电机组功频静特性系数, K_L 为负荷的频率调节效应系数。

将式(7)转换为标么值,并整理后得到:

$$\beta_* = k_r K_{C*} + K_{L*} \quad (8)$$

其中, $k_r = P_{CN} / P_{LN}$ 为系统备用系数,带“*”变量为上述相应变量的标么值。

风电并网以后对系统的自然频率特性系数的影响主要表现在如下 2 个方面^[18-19]。

a. 降低了电网等效的发电机组功频静特性系数 K_{C*} 。当系统总容量一定时,随着风电装机容量的持续增加,必然会代替一部分常规发电机组,而当前大部分变速风力发电机组的输出功率与系统的频率是解耦的,因此风电机组基本上不具有频率响应能力。而具有一次调频能力的常规机组被代替以后,系统等效的发电机组功频静特性系数 K_{C*} 将会减小。

b. 降低了系统备用系数 k_r , 考虑到风电的经济效益,通常风电机组不会被用来作为备用容量,而当系统的总容量一定时,随着风电并网容量的增加,常规机组的备用容量将会减小,而 K_{L*} 只与负荷的特性有关,可以认为风电接入前后保持不变,因此根据式(7)、(8)可知,风电接入以后,系统的自然频率特性系数 β_* 将会减小,而根据互联电网的频率偏差系数的选取原则,通常 $-10B$ 的取值尽量等于或者接近自然频率特性系数 β , 因此风电接入以后,选取的频率偏差特性系数 B 也应该减小。

2.2 风电并网后对有功不平衡量的影响

互联电网在正常运行的情况下,其有功不平衡量主要是由于负荷的波动引起的,根据电网调度的

短期负荷预测,其负荷不平衡功率可以定义为式(9)。

$$\Delta P_L = P_L - P_{L_{fcs}} \quad (9)$$

其中, P_L 为系统当前负荷, $P_{L_{fcs}}$ 为调度预测的负荷。

当风电接入以后,由于其输出功率的随机性和波动性,将会导致系统有功功率不平衡^[15],根据调度部门对风电场输出功率的预测,定义风电不平衡功率为:

$$\Delta P_W = P_W - P_{W_{fcs}} \quad (10)$$

其中, P_W 为风电场当前出力, $P_{W_{fcs}}$ 为调度预测的风电出力。

由式(9)和式(10),这里定义互联电网综合有功不平衡量为:

$$\Delta P_{ls} = \Delta P_L - \Delta P_W \quad (11)$$

假设 ΔP_L 和 ΔP_W 相互独立,则系统综合有功不平衡量的方差 $D(\cdot)$ 可表示为:

$$D(\Delta P_{ls}) = D(\Delta P_L - \Delta P_W) = D(\Delta P_L) + D(\Delta P_W) \quad (12)$$

由式(12)可知,风电接入以后,系统的有功不平衡量的方差变大了。

2.3 区域控制偏差与有功不平衡量之间的关系

当互联电网产生了有功不平衡量 ΔP_{ls} , 所有互联区域首先进行一次调频,根据一次调频结果有:

$$\sum_{i=1}^n \Delta P_{Li} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \Delta P_{tie-ij} = - \left(\sum_{i=1}^n \beta_i \right) \Delta f \quad (13)$$

其中, ΔP_{Li} 为各个控制区域的有功不平衡量; β_i 为各个控制区域的自然频率特性系数; ΔP_{tie-ij} 为互联两区域之间的联络线交换功率; n 为互联电网的控制区域个数。

对于整个互联电网而言, $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \Delta P_{tie-ij} = 0$, 记 $\Delta P_{ls} =$

$\sum_{i=1}^n \Delta P_{Li}$, $\beta_s = \sum_{i=1}^n \beta_i$, 因此式(13)可简化为:

$$\Delta f = \frac{-\Delta P_{ls}}{\beta_s} \quad (14)$$

由 TBC 模式下各个控制区域的区域控制偏差计算公式可知:

$$\sum_{i=1}^n ACE_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \Delta P_{tie-ij} - 10 \left(\sum_{i=1}^n B_i \right) \Delta f \quad (15)$$

其中, ACE_i 为控制区域的区域控制偏差。

记 $ACE_s = \sum_{i=1}^n ACE_i$, $B_s = \sum_{i=1}^n B_i$, 因此式(15)可简化为:

$$\Delta f = \frac{ACE_s}{-10B_s} \quad (16)$$

将式(14)代入式(16),并整理后得到:

$$ACE_s = \frac{10B_s}{\beta_s} \Delta P_{ls} \quad (17)$$

当前各大电网通常选取固定的频率偏差系数 B_s , 并且使 B_s 等于或者接近自然频率特性系数 β_s , 因此,由式(17)可知,互联电网区域控制偏差与区域有

功不平衡量具有比例关系。

3 基于统计理论的含风电的互联网 CPS 研究

3.1 计及风电的互联网 CPS1 研究

首先对 CPS1 进行一个统计分析,研究了风电并网以后,如何对互联网控制区域的 CPS1 指标产生影响。假设在某一个时间段 (t_1, t_2) 内有:

$$\overline{CF}_{(t_1, t_2)} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left(\frac{ACE_{s1min}}{-10B} \frac{\Delta f_{1min}}{\varepsilon_1^2} \right)_i \quad (18)$$

其中,下标 1 min 表示各个变量的 1 min 平均值; $\overline{CF}_{(t_1, t_2)}$ 为 (t_1, t_2) 内的 CPS1 服从因数; M 为时间段 (t_1, t_2) 内的分钟数。

根据 CPS1 考核标准要求,为了在 (t_1, t_2) 时间内满足 CPS1 指标,则必须满足下式:

$$\overline{CF}_{(t_1, t_2)} \leq 1 \quad (19)$$

当时间段 (t_1, t_2) 足够大时,可以近似地认为:

$$E(CF_{1min}) = \overline{CF}_{(t_1, t_2)} \quad (20)$$

其中, $E(\cdot)$ 为数学期望运算。

结合式(19)和式(20),一个等效的满足 CPS1 指标的形式如下式所示:

$$E(CF_{1min}) \leq 1 \quad (21)$$

根据式(2)可以得到:

$$E(CF_{1min}) = E \left(\frac{ACE_{s1min}}{-10B_s \varepsilon_1^2} \Delta f_{1min} \right) \quad (22)$$

其中, ACE_{s1min} 为各控制区域偏差总和在 1 min 内的平均值。

将式(16)代入式(22)并整理后得到:

$$E(CF_{1min}) = \frac{E(ACE_{s1min}^2)}{100B_s^2 \varepsilon_1^2} \quad (23)$$

假设 $E(\Delta P_{1s})=0$, 根据式(17)可得:

$$E(ACE_{s1min}) = 0 \quad (24)$$

根据方差的性质有:

$$E(ACE_{s1min}^2) = D(ACE_{s1min}) + [E(ACE_{s1min})]^2 \quad (25)$$

因此由式(23)—(25)可以得到:

$$E(CF_{1min}) = \frac{D(ACE_{s1min})}{100B_s^2 \varepsilon_1^2} \quad (26)$$

根据式(12)和式(17)可知, $D(\Delta P_{1s})$ 增大, $D(ACE_{s1min})$ 增大,而风电接入导致了系统自然频率响应系数减小,根据互联网频率偏差系数的选取原则, B_s 减小。因此根据式(26)可得 $E(CF_{1min})$ 增大。根据 CPS1 考核指标计算式(4)有:

$$CPS1 = [2 - E(CF_{1min})] \times 100\% \quad (27)$$

根据式(27)可知,风电并网以后,恶化了控制区域的 CPS1 考核指标,从而降低了互联网的频率控制性能。如果不采取控制措施,会进一步影响系统吸纳风电的能力。

3.2 计及风电的互联网 CPS2 研究

根据 CPS2 考核指标要求,每个 10 min 的区域控制偏差平均值在规定的范围以内,并且 CPS2 指标要求达到 90%,根据式(6),如果统计的时间比较长,则 $N_T(ACE_{10min})$ 数目越大,因此近似地认为只要有如下公式成立,可以等效地认为满足 CPS2 考核标准:

$$P\{|ACE_{s10min}| \leq L_{10}\} \geq 90\% \quad (28)$$

$$L_{10} = 1.65 \varepsilon_{10} \sqrt{(-10B_i)(-10B_s)}$$

其中, ACE_{s10min} 为各控制区域偏差总和在 10 min 内的平均值, $P\{\cdot\}$ 为概率运算。

设 $\sigma_s = \sqrt{D(ACE_{s10min})}$, 则有:

$$P\{|ACE_{s10min}| \leq L_{10}\} = P\left\{\frac{|ACE_{s10min}|}{\sigma_s} \leq \frac{L_{10}}{\sigma_s}\right\} \quad (29)$$

假设每个 10 min 的区域控制偏差采样点数为 k , 采样点记为 $ACE_{si}(i=1, 2, \dots, k)$, 由于每个采样的 ACE_{si} 就是一个随机变量,并且有:

$$E(ACE_{si}) = 0 \quad (30)$$

由于:

$$ACE_{s10min} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k ACE_{si} \quad (31)$$

根据数学期望的性质有:

$$E(ACE_{s10min}) = 0 \quad (32)$$

同时根据式(31)和式(32)可以得到:

$$D(ACE_{s10min}) = \frac{1}{k} D(ACE_{si}) \quad (33)$$

因此根据中心极限定理有:

$$\frac{ACE_{s10min}}{\sigma_s} \sim N(0, 1) \quad (34)$$

由标准正态分布可知:

$$P\left\{\left|\frac{ACE_{s10min}}{\sigma_s}\right| \leq 1.65\right\} = 90\% \quad (35)$$

对比式(28)和式(35),可以得到,如果要满足 CPS2 指标,则必须有下列关系得到满足:

$$\frac{L_{10}}{\sigma_s} \geq 1.65 \quad (36)$$

将 L_{10} 与 σ_s 表达式代入式(36)并简化后得到:

$$\frac{\varepsilon_{10} \sqrt{(-10B_i)(-10B_s)}}{D(ACE_{s10min})} \geq 1 \quad (37)$$

同理,风电接入以后,由于 $D(ACE_{s10min})$ 增大,频率偏差系数减小,互联网能够满足式(37)的概率降低了,CPS2 考核指标将会减小。系统的有功控制性能将会恶化。

4 仿真分析

以两区域火电互联网为例(如图 1 所示),考虑 2 种不同比例的连接方式:方式 A 是 2 个区域具有相同的容量,运行特性相似,全部常规发电机组的装机容量为 2000 MW,峰值负荷为 1600 MW;方式

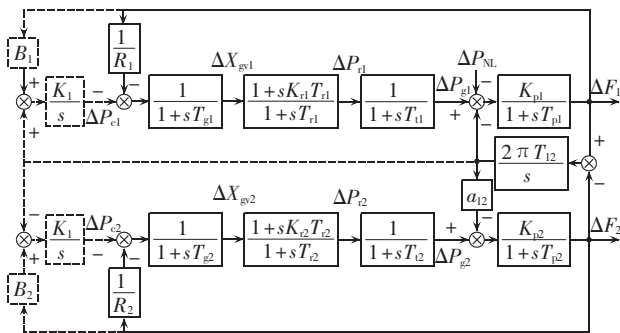


图 1 两区域互联电网仿真模型
Fig.1 Simulation model of two-area interconnected power grid

B 是区域 1 的装机容量、峰值负荷与方式 A 相同,保持不变,但是区域 2 的装机容量、峰值负荷变为原来的 5 倍,在方式 B 下,区域 2 的装机容量变为 10000 MW,峰值负荷变为 8000 MW。考虑在区域 1 中接入不同容量的风电,分析互联电网 CPS 考核指标的变化情况。仿真时间为 12 h,并统计整个互联电网的 CPS 指标,为了便于分析比较,以风电穿透功率为 0 时的值作为基准,对不同风电穿透功率下 CPS 指标值进行标准化处理,即:

$$CPS_{\text{Normalize}} = \frac{CPS_p}{CPS_{p=0}} \quad (38)$$

其中, P 为风电穿透功率(%); CPS_p 为在风电穿透功率为 P 时的 CPS 指标值, $CPS_{p=0}$ 为风电穿透功率 $P=0$ 时的 CPS 指标值。

具体参数选取如下: $T_{g1}=T_{g2}=0.08\text{ s}$, $K_{r1}=K_{r2}=0.5$, $T_{r1}=T_{r2}=10\text{ s}$, $T_{l1}=T_{l2}=0.3\text{ s}$, $K_{p1}=K_{p2}=120$, $T_{p1}=T_{p2}=20\text{ s}$, $R_1=R_2=2.4$, $B_1=B_2=0.425$, $T_{l2}=0.086\text{ 6}$, $\varepsilon_1=0.022\text{ Hz}$, $\varepsilon_{10}=0.018\text{ Hz}$, $K_1=K_2=0.7$,在区域 1 接入不同容量的风电,互联在 2 种方式下,互联电网的风电穿透功率如表 1 所示。

表 1 风电穿透功率
Tab.1 Wind power penetration levels

区域 1 风电容量/%	互联电网的风电穿透功率/%	
	方式 A	方式 B
0	0	0
5	2.5	0.83
10	5.0	1.67
15	7.5	2.50
20	10.0	3.33

本文从统计理论的角度,计及不同风电分布特性,评估了风电接入电网后对 CPS 的影响(方式 A),其中重点以正态分布、 t 分布以及威布尔分布为例开展了仿真研究,结果如图 2、3 所示。

以正态分布为例,考虑在不同容量电网区域接入风电,通过仿真分析不同比例的风电容量接入电网以后对互联电网 CPS 考核指标的影响情况。CPS1 考核指标的仿真结果如表 2 所示。

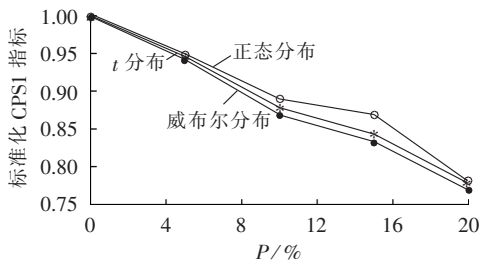


图 2 风电功率的分布特性对 CPS1 指标的影响
Fig.2 Impact of wind power distribution on CPS1 index

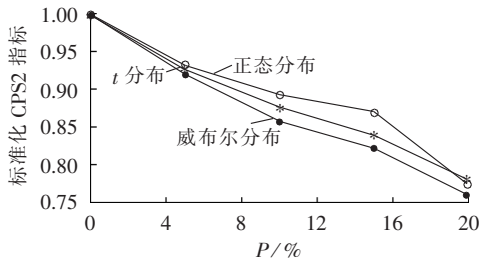


图 3 风电功率的分布特性对 CPS2 指标的影响
Fig.3 Impact of wind power distribution on CPS2 index

表 2 CPS1 仿真结果

Tab.2 Simulative results of CPS1

区域 1 风电容量/%	互联电网标准化 CPS1 指标	
	方式 A	方式 B
0	1.000	1.000
5	0.951	0.964
10	0.892	0.939
15	0.883	0.903
20	0.783	0.867

从仿真结果可以看出,在区域 1 中接入不同容量的风电时,系统的 CPS1 指标呈下降趋势,与第 3 节分析结果相吻合,如图 4 所示。

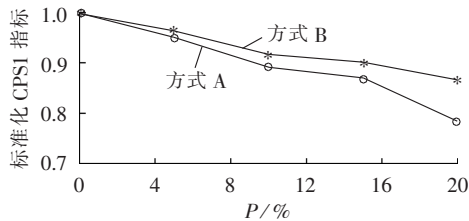


图 4 CPS1 考核指标变化情况

Fig.4 Variation of CPS1 evaluation index

CPS2 考核指标的仿真结果见表 3。可见,CPS2 指标也随着风电穿透功率比例的增大而降低,见图 5。

表 3 CPS2 仿真结果

Tab.3 Simulative results of CPS2

区域 1 风电容量/%	互联电网标准化 CPS2 指标	
	方式 A	方式 B
0	1.000	1.000
5	0.931	0.990
10	0.892	0.981
15	0.878	0.974
20	0.773	0.967

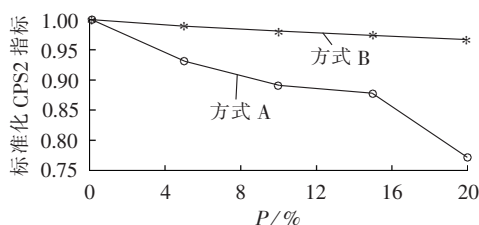


图 5 CPS2 考核指标变化情况

Fig.5 Variation of CPS2 evaluation index

随着风电穿透功率的持续增大,系统的 CPS 考核指标将会恶化,表明系统的频率控制性能将会变差。当风电穿透功率超过某个阈值时,互联电网将会违背 CPS 考核标准。结合本文的理论分析和推导,初步给出一个确定风电穿透功率的新思路:以 $CPS1 = 100\%$ 和 $CPS2 = 90\%$ 作为门槛值,通过仿真分析,确定使互联电网的 CPS1 和 CPS2 考核指标等于门槛值时的风电穿透功率,此风电穿透功率即为该互联电网能够承受的最大风电容量比例。

5 结论

本文采用统计理论对风电接入系统后的 CPS 进行了研究分析,结合 CPS 的统计原理,进行了详细的理论分析和公式推导,分析结论表明 CPS 考核指标随风电并网容量的增大而减小。通过仿真分析得到如下结论:

a. 针对风电不同分布特性对 CPS 的影响,基于所列举的 3 种典型分布,其对 CPS 的影响程度按由低到高排列分别为正态分布、 t 分布、威布尔分布;

b. 不同容量的电网接入风电以后,CPS 考核指标将会变差,且电网容量越小,CPS 指标受影响程度越大,该仿真结果与理论分析相吻合。

受国家能源政策对风电发展的支持,风电并网规模日益庞大,而风电固有的随机性和波动性对电网 CPS 的影响逐渐显现出来,应给予重点关注。通过本文的分析,明确了风电对电网 CPS 影响的相关机理和因素,为后续开展多种能源协调控制以改善系统的 CPS 指标奠定了理论支撑,具备良好的参考及借鉴意义。

参考文献:

- [1] JALEELI N,VANSLYCK L S. NERC's new control performance standards[J]. IEEE Trans on Power Systems,1999,14(3):1092-1099.
- [2] 孙惠娟,彭春华,易洪京. 大规模风电接入电网多目标随机优化调度[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):123-128.
SUN Huijuan,PENG Chunhua,YI Hongjing. Multi-objective stochastic optimal dispatch of power system with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):123-128.
- [3] 刘奇,刘斌,余涛. 基于 CPS 统计特性的自适应自动发电控制策略[J]. 电力自动化设备,2010,30(12):74-78.

- LIU Qi,LIU Bin,YU Tao. Adaptive AGC strategy based on statistical property of CPS[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(12):74-78.
- [4] 白永祥,房大中,侯佑华,等. 调度中心大规模风电场实时在线监控系统[J]. 电力自动化设备,2010,30(11):6-8.
BAI Yongxiang,FANG Dazhong,HOU Youhua,et al. Real-time online monitoring and control system in dispatch center for large-scale wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(11):6-8.
- [5] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术,2007,31(3):77-81.
CHI Yongning,LIU Yanhua,WANG Weisheng,et al. Study on impact of wind power integration on power system[J]. Power System Technology,2007,31(3):77-81.
- [6] BANAKAR H,LUO Changling,OOI B T. Impacts of wind power minute-to-minute variations on power system operation[J]. IEEE Trans on Power Systems,2008,23(1):150-160.
- [7] 杨小煜,沈松林,李运平,等. 华北、东北联网后华北电网自动发电控制(AGC)及其考核的实现[J]. 电网技术,2001,25(7):60-62.
YANG Xiaoyu,SHEN Songlin,LI Yunping,et al. Implementation of automatic generation control in North China Power Grid and its assessment after its interconnection with Northeast China Power Grid[J]. Power System Technology,2001,25(7):60-62.
- [8] 唐跃中,张王俊,张健,等. 基于 CPS 的 AGC 控制策略研究[J]. 电网技术,2004,28(21):75-79.
TANG Yuezhong,ZHANG Wangjun,ZHANG Jian,et al. Research on control performance standard based control strategy for AGC [J]. Power System Technology,2004,28(21):75-79.
- [9] SASAKI T,ENOMOTO K. Statistical and dynamic analysis of generation control performance standards[J]. IEEE Trans on Power Systems,2002,17(2):476-481.
- [10] HOONCHAREON N B,ONG C M,KRAMER R A. Feasibility of decomposing ACE to identify the impact of selected loads on CPS1 and CPS2[J]. IEEE Power Engineering Review,2002,22(5):68.
- [11] JALEELIT N,VANSLYCK L S. Control performance standards and procedures for interconnected operation[R]. Palo Alto,California,America:Electric Power Research Institute,1997.
- [12] 郭玉峰,于达仁. CPS 在线计算的递推算法[J]. 中国电机工程学报,2004,24(5):73-77.
GUO Yufeng,YU Daren. The recurrence algorithm of CPS on-line computation[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(5):73-77.
- [13] de ALMEIDA R G,LOPES J A P. Primary frequency control participation provided by double fed induction wind generators [C]//15th Power System Computation Conference. Liege,Belgium:[s.n.],2005:22-26.
- [14] BHATT P,ROY R,GHOSH S P. Dynamic participation of doubly fed induction generator in automatic generation control [J]. Renewable Energy,2011,36(4):1203-1213.
- [15] VIDYANANDAN K V,SENROY N. Primary frequency regulation by deloaded wind turbines using variable droop[J]. IEEE Trans on Power Systems,2013,28(2):837-845.
- [16] 龙虹毓,马建伟,吴镔,等. 含热电联产和风电机组的电网节能调度[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):18-22.
LONG Hongyu,MA Jianwei,WU Kai,et al. Energy conservation dispatch of power grid with mass cogeneration and wind tur-

- bines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 18-22.
- [17] 陈振寰, 陈永华, 行舟, 等. 大型集群风电有功智能控制系统控制策略(二)风火电“打捆”外送协调控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 12-15.
- CHEN Zhenhuan, CHEN Yonghua, XING Zhou, et al. A control strategy of active power intelligent control system for large cluster of wind farms part two coordination control for shared transmission of wind power and thermal power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 12-15.
- [18] 关宏亮, 迟永宁, 王胜伟, 等. 双馈变速风电机组频率控制的仿真研究[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 61-65.
- GUAN Hongliang, CHI Yongning, WANG Shengwei, et al. Simulation on frequency control of doubly fed induction generator based wind turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 61-65.
- [19] 贺益康, 郑康, 潘再平, 等. 交流励磁变速恒频风电系统运行研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 55-59.
- HE Yikang, ZHENG Kang, PAN Zaiping, et al. Investigation on an AC excited variable speed constant frequency wind power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems,

2004, 28(13): 55-59.

作者简介:

翁毅选(1984-), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、新能源接入后大电网自动发电控制(E-mail: Yixuan_Weng@163.com);

邓长虹(1963-), 女, 湖北武汉人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为大电网安全稳定分析及控制、新能源接入及电网智能控制、优化控制理论及电网规划、电力系统建模及数字仿真(E-mail: dengch-whu@163.com);

黄文涛(1984-), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 主要研究方向为抽水蓄能建模及其在大电网中的应用、电力系统稳定与控制(E-mail: hwthwt1223@163.com);

肖永(1962-), 男, 贵州贵阳人, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化(E-mail: xiaoyong@gzsy.csg.cn);

颜霞(1970-), 女, 贵州贵阳人, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化(E-mail: yanxia519@sina.com);

赵维兴(1979-), 男, 河南新乡人, 高级工程师, 研究方向为电网优化运行与控制。

Research of CPS based on statistical theory for interconnected power grid with wind power

WENG Yixuan¹, DENG Changhong¹, HUANG Wentao¹, XIAO Yong², YAN Xia², ZHAO Weixing²

(1. College of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Guizhou Power Grid Company, Guiyang 550002, China)

Abstract: The influence of wind power on the CPS(Control Performance Standard) evaluation indexes of interconnected power grid in China is researched based on the statistical theory. The mathematical expectation of key variables is used to transform the traditional CPS formula and the CPS evaluation indexes for quantitative analysis are deduced. A two-area interconnected power grid model is built with MATLAB/Simulink and the simulative results show that, the influence of wind power distribution on CPS index increases from normal distribution, t distribution to Weibull distribution; the bigger the interconnected power grid capacity becomes, the larger its CPS evaluation index drops.

Key words: statistics; wind power; CPS evaluation index; interconnected power grid; control

(上接第 78 页 continued from page 78)

Optimal siting of power emergency service station considering outage risk of loads

WANG Hong¹, LIN Zhenzhi¹, WEN Fushuan¹, XIANG Zhongming², GU Wei², WU Huahua²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China;

2. Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007, China)

Abstract: A model for the optimal siting of power emergency service stations is developed with the consideration of power outage risk of loads, which is determined by the power shortage, load type and outage probability in unit time. The model takes the minimum total risk of all loads as its objective and introduces the overtime penalty factor into the time constraint of emergency service response when it can not be satisfied in practical conditions. Floyd algorithm is applied to solve the optimization model. Case study shows that, because the proposed model considers the difference of power outage risk among loads, the practical larger power outage cost is avoided, which may occur if only the minimum response time is taken as its objective.

Key words: power emergency service; optimal siting; outages; risks; Floyd algorithm; models; optimization