

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.06.006

计及风电的电力系统检修备用容量评估及应用

高玉洁¹, 张永凯², 李蓉蓉³, 宁光涛¹

(1. 海南电网公司, 海口 570203; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049;
3. 南方电网科学研究院, 广州 510080)

摘要:系统的检修备用容量定义为满足系统机组检修而需要设置的容量。为评估风电出力的不确定性以及机组检修需求不确定性对系统检修备用容量评估带来的影响,建立了考虑机组检修需求不确定性和风电场风速相关性的检修备用容量评估模型,同时提出了风电接入后的检修备用容量不足概率这个检修备用容量充裕度指标来评估系统需要设置的检修备用容量。在检修备用容量评估应用方面,提出了包含机组检修需求和风电波动性信息的机组检修概率的概念,对机组的强迫停运率进行修正以用于电力系统随机生产模拟、发电系统、发输电系统充裕度评估以及风险评估等。算例中分析了风电场的相关性和风电装机容量对检修备用容量的影响,得到结论:风电场相关系数越大,系统所需检修备用容量越大;风电装机容量越大,系统所需检修备用容量越小。

关键词: 风电; 相关性; 检修需求不确定; 检修备用容量; 检修概率

Maintenance Reserve Capacity Evaluation and Its Application Considering Wind Power and Maintenance Demand Uncertainty

GAO Yujie¹, ZHANG Yongkai², LI Rongrong³, NING Guangtao¹

(1. Hainan Power Grid Company, Haikou 570203, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China)

Abstract: Maintenance reserve capacity is defined as a capacity to assure all units' maintenance on time. In order to evaluate the impact of uncertainty of unit maintenance demand (UMD) and the stochastic of wind power to maintenance reserve capacity evaluation, this paper establishes a model, which considers UMD uncertainty and the impact of stochastic of wind power, and proposes an index, which is maintenance reserve not enough probability considering wind (MNEPCW), to evaluate the maintenance reserve. In the aspect of application, this paper proposes the definition of maintenance probability and uses it to modify the forced outage rate, which can be used to conduct probabilistic production simulation, generation system and composite system evaluation, and system risk analysis. Case study uses real data of one province to evaluate the maintenance reserve and analyses the impact of speed cross-correlation and wind farm capacity to maintenance reserve evaluation, which shows that maintenance reserve increases with the cross correlation increases, maintenance reserve decreases with the wind farm capacity increases.

Key words: wind power; cross-correlation; uncertainty of maintenance demand(UMD); maintenance reserve capacity; maintenance probability

0 引言

中国电力系统^[1]的备用容量体系分为负荷备用

容量、事故备用容量和检修备用容量^[2-4]。系统的检修备用容量定义为满足系统机组检修而需要设置的容量,并不是每个时段的检修容量,而是系统装机控制时段(月、旬)的检修容量,其与系统年负荷曲线的

收稿日期:2014-12-21; 修回日期:2015-01-26

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA050201)。

Project Supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2012AA050201).

特性密切相关。

风电的接入会影响到系统的检修备用容量。风电出力具有随机性和间歇性特点,风电出力的波动幅度大,波动频率无规律性,受气象因素影响,风电出力日间可能波动较大,大规模并网后势必会对检修备用容量评估带来一定的影响。目前文献研究主要集中在机组的检修计划安排,对检修备用容量研究甚少,文[5]中以风电接入系统后失负荷期望最小为目标函数进行机组检修计划安排;文[6]中以系统检修成本和风电弃风量最小为目标函数进行机组检修计划安排,但是上述文献都涉及到机组组合问题,而且其重点在于机组的检修计划安排,对于规划阶段的检修备用容量评估没有涉及。而且规划中机组检修需求并不能提前确定^[7-8],同样对系统的检修备用评估带来了影响。

目前系统在随机生产模拟、可靠性计算以及风险评估等方面一般不考虑机组的检修,而机组的检修对系统规划的影响非常可观,因此规划中如何在机组的检修需求和风电波动情况下考虑机组的检修信息是一个亟待解决的问题。

文中基于机组检修需求的不确定性,提出了一种处理检修需求不确定的方法,该方法不需要大量机组的历年检修数据,且计算简单,适用于规模较大的系统;对于风电的波动性,应用威布尔分布产生风电场风速数据,并采用楚列斯基分解法^[9]考虑不同风电场风速的相关性,在该基础上将蒙特卡洛方法^[10-11]引入到检修备用容量评估中,提出评估风电接入后系统的检修备用容量充裕度指标——考虑风电波动的检修备用容量不足概率(MNEPCW)确定风电接入后系统所需预留的检修备用容量。

为了在机组的检修需求不确定和风电出力波动情况下将机组的检修信息在随机生产模拟、可靠性计算以及风险评估等领域中考虑,提出了机组检修概率的概念,该检修概率包含了风电的波动性和机组检修需求不确定的信息,通过机组的检修概率对机组的强迫停运率进行修正,进而进行随机生产模拟、可靠性计算以及风险评估等。

1 风电场相关性模拟

1.1 风速的产生

由于风电机组出力的随机性是由风速引起的,因此掌握风速变化规律对于风电机组的出力情况十分关键。风速的分布用威布尔分布来描述^[12-13]:

$$\phi(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]. \quad (1)$$

式(1)中: v 为平均风速; c 为尺度系数,反映该地区平均风速的大小; k 为形状系数,反映风速分布的特点。

不同风电场的风速均可由式产生,如果不同风电场模拟的风速由不同的随机数种子产生,则产生的风速明显不具有相关性^[14]。

1.2 风速相关性的处理

不同风电场之间的风速相关性可以用相关系数描述,相关系数的定义为

$$R_{xy} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \mu_y)^2}}. \quad (2)$$

式(2)中: R_{xy} 为风电场 x 与 y 的风速相关系数; x_i 与 y_i 为风电场 x 与 y 的风速序列; N 为序列中包含的元素个数; μ_x 和 μ_y 为风电场 x 与 y 的风速均值,分母为风电场 x 与 y 风速的标准差的乘积。

为了得到任何相关性下风电场 x 与 y 的风速序列,文中运用楚列斯基分解法^[9]得到具有指定相关性的风速序列。

给定一个由相互独立变量组成的向量 $z=(z_1, z_2, \dots, z_n)^T$,其均值组成的向量为 $\mu_z=(0, 0, \dots, 0)^T$,由于其相互独立,其风速相关系数矩阵为

$$\Omega_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

一个新的均值为 $\mu_y=(\mu_{y1}, \mu_{y2}, \dots, \mu_{yn})^T$ 的具有相关性的向量 $y=(y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ 可以由式(3)得到。

$$y = Lz + \mu_y. \quad (3)$$

式(3)中, y 的相关性系数矩阵为风电场的相关系数矩阵 Ω_y 为

$$\Omega_y = \begin{bmatrix} 1 & R_{y12} & R_{y13} \\ R_{y21} & 1 & R_{y23} \\ R_{y31} & R_{y32} & 1 \end{bmatrix}.$$

$$\Omega_y = LL^T. \quad (4)$$

式(4)中, L 为下三角矩阵。

因此文中产生相关性风速的步骤为:①根据威布尔分布,利用反变换法^[9]由式 $v_i = c[-\ln(x_i)]^{1/k}$ 产生多风场不具有相关性的风速向量;②从该向量中减去风速均值向量并除以风速的方差得到向量 z ;③根据已知的风电场相关系数矩阵,根据式(3)求得具有指定相关性的风速向量。

1.3 风电场出力模型

风电机组的出力具有随机性,与风速密切相关,可以用分段函数表示为^[12-13]

$$P = \begin{cases} 0 & \nu < \nu_{ci}, \nu > \nu_{co} \\ \frac{\nu^3 - \nu_{ci}^3}{\nu_r^3 - \nu_{ci}^3} P_r & \nu_{ci} \leq \nu \leq \nu_{ro} \\ P_r & \nu_r \leq \nu \leq \nu_{co} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: ν_{ci} 为切入风速; ν_{co} 为切出风速; ν_r 为额定风速; P_r 为风电机组额定输出功率。

风电场 x 的风电出力为

$$P_x = n_x (1 - \eta_x) P. \quad (6)$$

式(6)中: n_x 为风电场 x 风电机组数目; η_x 为尾流效应。

该节介绍了风电场出力的模拟, 考虑了不同风电场之间的相关性, 并给出了处理风电场风速相关性的方法, 为系统检修备用容量评估以及检修概率和修正强迫停运率的计算打下基础。

2 计及风电的检修备用容量评估

电力系统规划中机组的检修需求不能确定, 而不同的检修需求对应的检修备用容量不同, 这会对检修备用容量评估造成很大的影响。

鉴于风电机组随时故障随时检修以及在规划中不安排风电机组检修的现状, 该节将风电场的出力等效为负的负荷, 不考虑风电机组的检修。因此, 风电场出力的波动性就变为负荷的波动性, 而负荷的波动会造成应用等备用法时不同负荷下系统的检修备用容量不同, 不能准确地给出一个系统所需的检修备用容量。

因此文中对机组的检修需求进行了处理, 为了处理风电的波动性, 提出了评估含风电的电力系统检修备用容量充裕度的指标——考虑风电波动的检修备用容量不足概率(MNEPCW)确定风电接入后系统所需预留的检修备用容量。

2.1 机组检修需求处理

根据发电企业检修设备导则, 发电机组的检修 5 a 为一个周期, 5 a 的检修需求为 A-C-C-B-C, 不同容量机组相同检修需求下对应的检修时间不同。在文[7]中提出了一种检修需求不确定的处理方法, 该方法考虑了机组检修需求的电厂分布特性和机组类型分布特性, 得到这些特性需要大量的系统历年检修数据, 当系统的检修数据较少时会制约该方法的应用。文中考虑到检修备用容量评估在系统规模较大时才有意义的情况, 针对规模较大的系统提出另一种处理机组检修需求不确定的方法^[8], 方法处理为:

1) 同种类型机组具有相同的检修需求, 如对于水电机组, 不再区分 A、B、C 3 种检修需求, 统一认为水电机组具有相同的检修需求, 对应的检修时间

计算见式(7)。

$$T = \frac{p(A)T(A) + p(B)T(B) + p(C)T(C)}{T_{cycle}}. \quad (7)$$

式(7)中: T 为相同类型机组的检修时间; $p(A)$ 、 $p(B)$ 、 $p(C)$ 分别为机组进行 A、B、C 类检修的频数; $T(A)$ 、 $T(B)$ 、 $T(C)$ 分别为机组进行 A、B、C 类检修所需时间; T_{cycle} 为机组的检修周期, 根据《发电企业检修设备导则》, $T_{cycle}=5$, $p(A)=1$, $p(B)=1$, $p(C)=3$ 。

2) 不同类型机组具有不同的检修需求。由于不同类型机组检修时间差值明显, 因此该方法将机组类型差异考虑在内, 不同类型机组所对应的 T 不同。

2.2 检修备用容量评估模型

系统检修备用容量评估模型如下。

2.2.1 目标函数

目标函数 $\min \sqrt{\frac{1}{T} \left[\sum_{t=1}^T (R_t - R_c)^2 \right]}$ 为系统备用容量的标准差最小值, 使检修周期内系统每个检修时段的备用容量尽可能相等。其中: T 为检修周期, 若以旬为单位, $T=36$; R_t 为第 t 时段内系统备用容量, 表达式为式(8); R_c 为检修周期 T 内各个时段备用容量的平均值。

$$R_t = P_{\text{capacity}} - P_{\text{mcr}} - (P_L - P_{\text{wind}t}). \quad (8)$$

式(8)中: P_{capacity} 为系统常规机组装机容量; $P_{\text{wind}t}$ 为 t 时段风电机组出力; P_{mcr} 为 t 时段检修容量; P_L 为 t 时段负荷。

2.2.2 约束条件

1) 同种类型机组具有相同的检修需求, 不同类型机组的检修需求不同。

$$T_i = \frac{p(A)T_i(A) + p(B)T_i(B) + p(C)T_i(C)}{T_{icycle}}. \quad (9)$$

式(9)中: i 为机组类型, 当 $i=1$ 时, 为火电机组; 当 $i=2$ 时, 为水电机组; 当 $i=3$ 时, 为气电机组; $i=4$ 时, 为抽水蓄能机组; 当 $i=5$ 时, 为核电机组。

2) 检修活动的连续性。一台机组开始检修后必须在连续的期间内完成, 即

$$\sum_{t=t_k}^{t_k+S_k-1} m_{kt} = S_k. \quad (10)$$

式(10)中: k 为第 k 台发电机组; m_{kt} 为机组检修状态, 取 0 时, 为在时段 t 内无检修; 取 1 时, 为在时段 t 内检修; t_k 为检修开始时段; S_k 为检修持续时段。

3) 检修班组约束。一般情况下, 同一电厂在同一时段内不能安排两台发电机组检修。

$$\sum_{k \in V_r} m_{kt} = V_{rt}. \quad (11)$$

式(11)中: k 为第 k 台发电机组; m_{kt} 为机组检修状态; V_{rt} 为检修班组 V_r 在 t 时段可同时检修的发电

机组最多台数。

4)水电机组不能安排在丰水期检修。

$$M_{\text{hydro}} \cap W_{\text{hydro}} = \emptyset. \quad (12)$$

式(12)中: M_{hydro} 为水电机组可安排检修时间段; W_{hydro} 为丰水期时间段。

5)核电机组的检修和换料同时进行。

$$t_k = c_k; \quad (13)$$

$$S_k = Q_k. \quad (14)$$

式(13)、(14)中: c_k 为换料起始时间段; Q_k 为换料持续时间; t_k 为检修开始时段; S_k 为检修持续时段。

该模型充分考虑了风电场之间的相关性和检修需求不确定性,对应于每次模拟下的风速都有一个相应的等效负荷值,运用启发式方法对模型进行求解,每次模拟下求解所得到的结果作为检修容量评估的数据。

2.3 检修备用容量评估

为了评估计及风电的检修备用容量,参考蒙特卡洛方法运用检修备用容量充裕度指标——考虑风电波动的检修备用容量不足概率(MNEPCW)确定风电接入后系统所需预留的检修备用容量,表达式见式(16),MNEPCW 的含义为系统模拟的检修备用容量超过设定检修备用容量的概率。

$$MRCNS_i = \max\{0, F_i(x_i, P_{Li}) - SSMRC_i\}; \quad (15)$$

$$MNEPCW = \frac{\sum_{i=1}^N I_i MRCNS_i}{N}. \quad (16)$$

式(15)、(16)中: N 为总模拟次数; $SSMRC_i$ 为装机容量控制时段系统设定的检修备用容量; $F_i(x_i, P_{Li})$ 为一次模拟下计算得到的检修备用容量;选取的抽样次数 N 必须使得充裕度指标的方差系数收敛; I_i 为一个指示变量,表达式为

$$I_i = \begin{cases} 0 & MRCNS_i = 0 \\ 1 & MRCNS_i > 0 \end{cases}. \quad (17)$$

设定的检修备用容量值的不同会造成充裕度评估结果的不同,进一步可以得到充裕度指标 MNEPCW 随设定的检修备用容量变化的曲线,从曲线中根据系统可承受的检修备用容量充裕度指标选取相应的检修备用容量作为评估得到的检修备用容量。计算流程见图 1。

3 检修备用容量评估的应用

3.1 机组检修概率的计算

机组的检修概率定义为机组在某一时段进行检

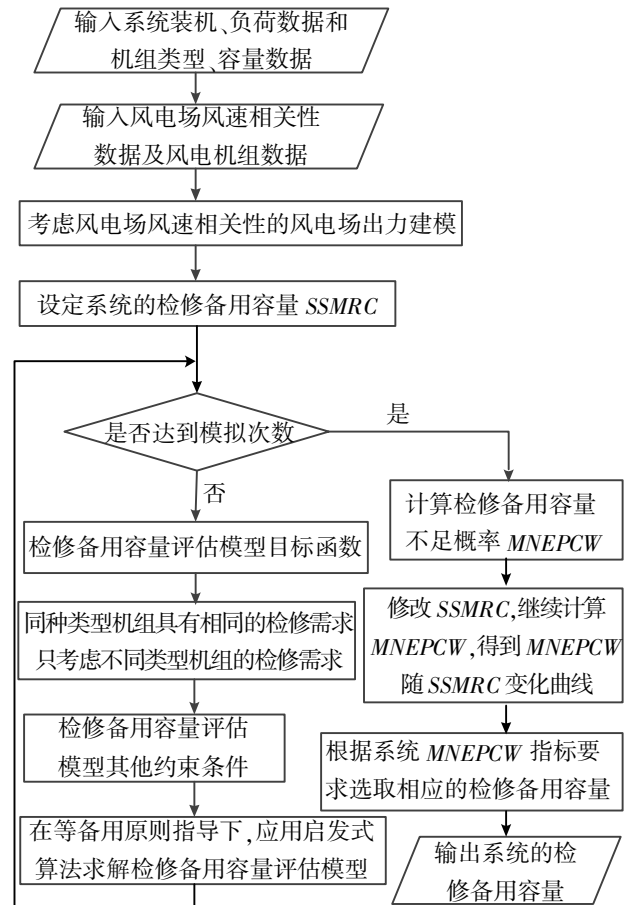


图 1 检修备用容量评估流程图

Fig. 1 Flow chart of maintenance reserve capacity evaluation

修的可能性,在检修备用容量充裕度评估的同时,可以根据检修备用容量评估模型求得第 i 次模拟下机组 k 在 t 时段的检修状态 x_{ki}^t 。 $x_{ki}^t=1$ 为机组 k 在 t 时段进行检修; $x_{ki}^t=0$ 为机组 k 在 t 时段不进行检修。当系统进行 N 次模拟后,可以得到机组 k 在 t 时段的检修概率 p_k^t 。

$$p_k^t = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ki}^t}{N}. \quad (18)$$

3.2 修正强迫停运率的计算

电力系统充裕度评估^[15-20]中,通常采用机组的两状态模型,即正常状态和故障停运状态。一般认为正常运行持续时间和故障修复时间服从指数分布,即故障率 λ 和修复率 μ 是常数,可以求得机组 k 的强迫停运率 FOR_k 为

$$FOR_k = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}. \quad (19)$$

在得到机组 k 各时段检修概率后,可以对机组 k 的强迫停运率进行修正^[21]。修正公式为

$$FOR_k' = 1 - (1 - FOR_k)(1 - p_k^t). \quad (20)$$

可见,在计及机组各时段检修概率后,机组各时

段强迫停运率不再相同, 如果机组 k 在 t 时段检修概率为 1, 那么机组 k 在 t 时段的强迫停运率为 1。

通过计算机组的检修概率对机组的强迫停运率进行修正, 在得到包含机组检修信息的机组修正强迫停运率后, 就可以对系统进行随机生产模拟、发电可靠性、发输电可靠性计算和风险评估。

4 算例分析

4.1 检修备用容量评估

文中以某省电力系统为例进行分析和计算。该省总共有 43 个火电厂、16 个气电厂、5 个水电厂、2 个核电厂和 2 个抽水蓄能电厂, 共 197 台机组, 两个装机容量分别为 3 000 MW 的风电场, 系统可承受的检修备用容量充裕度指标 $MNEPCW=0.01$ 。

根据该省历史风速数据, 可以得到该省逐旬风速的威布尔分布, 见表 1; 风电场之间的相关性见表 2, 风电场尾流效应系数为 0.05; 风电机组数据见表 3; 系统负荷数据见图 2。由表 1-3、图 2 可以看出, 系统的装机控制时段为第 22 旬。

表 1 该省逐旬风速的威布尔分布

Table 1 Weibull distribution every ten days

时间	c	k	时间	c	k
1	6.17	2.10	19	4.21	1.99
2	6.38	2.14	20	4.15	1.95
3	6.58	2.16	21	4.08	1.93
4	7.14	2.21	22	4.01	1.92
5	7.43	2.10	23	4.03	1.93
6	7.59	2.00	24	4.07	1.94
7	8.46	1.82	25	4.10	1.95
8	8.26	1.92	26	4.75	1.96
9	7.86	1.85	27	5.37	1.97
10	7.22	2.23	28	5.78	2.00
11	7.00	2.20	29	5.54	1.86
12	6.85	2.13	30	5.34	1.75
13	6.20	2.10	31	5.13	1.63
14	5.98	1.98	32	6.37	1.67
15	5.56	1.76	33	6.89	1.69
16	5.33	1.62	34	7.20	1.71
17	4.92	1.75	35	6.89	1.87
18	4.56	1.86	36	6.51	1.99

根据《发电企业检修设备导则》和某省检修的实际情况, 得到不同类型机组的检修时间, 见表 4。鉴于该省的发电机组以火电机组为主, 将火电机组按容量再细分为 3 类: $P>600$ MW 机组(火电机组 1), $P[350$ MW, 600 MW]机组(火电机组 2)和 $P<350$ MW 机组(火电机组 3)。

该系统有 8 台新机组投运, 机组投运时间见表 5。

表 2 风电场相关系数

Table 2 Wind farm correlation coefficient matrix

风电场	风电场 1	风电场 2
风电场 1	1.0	0.9
风电场 2	0.9	1.0

表 3 风电机组数据

Table 3 Wind generation data

额定容量/MW	切入风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	切出风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	额定风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1.5	3.0	25.0	13.5

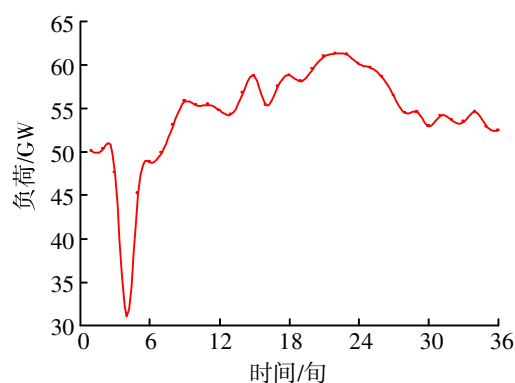


图 2 该省逐旬负荷

Fig. 2 Load data for every ten days

表 4 不同类型机组的检修需求

Table 4 Maintenance demands of different types of units

机组类型	检修需求/天
火电机组 1	41
火电机组 2	32
火电机组 3	25
水电机组	34
气电机组	27
核电机组	人工指定
抽水蓄能机组	37

机组投运时段增加了系统的装机容量并且新投运机组在投运年不检修。在应用等备用法时, 为保证系统装机水平一定, 将机组投运时段之前的负荷加上投运机组的容量进行修正, 以使用启发式方法计算检修容量。

表 5 新投运机组

Table 5 New commitment units

机组	容量/MW	投运时间	机组	容量/MW	投运时间
机组 1	1 000	2011-02-01	机组 5	600	2011-06-01
机组 2	600	2011-07-01	机组 6	1 086	2011-07-01
机组 3	600	2011-10-01	机组 7	300	2011-02-01
机组 4	600	2011-05-01	机组 8	300	2011-03-01

由式(5)抽样逐旬风速数据, 并用式(3)处理风电

场之间的相关性。处理之前的风速见图 3, 处理之后的风速见图 4。由图 4 可看出, 应用楚列斯基分解法处理风电场之间风速相关性问题的可达到很好的效果。

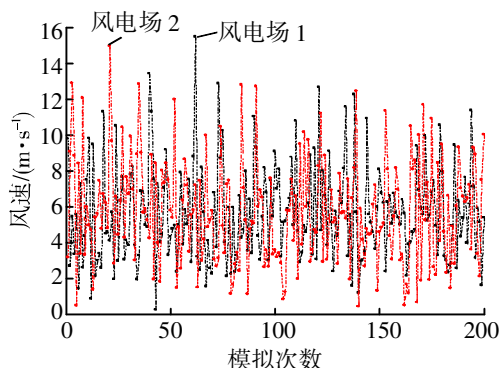


图 3 不具有相关性($R_{xy}=0$)的风速数据

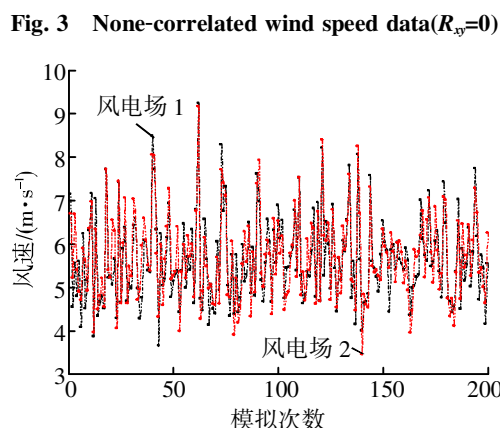


图 4 强相关性($R_{xy}=0.9$)的风速数据

Fig. 4 Highly-correlated wind speed data($R_{xy}=0.9$)

根据风电机组数据和风速数据按照式(6)计算风电场出力, 修正系统负荷数据, 应用检修备用容量评估模型进行检修备用容量评估。根据模型得到检修备用容量充裕度指标随设定检修容量变化的曲线, 见图 5。从图 5 中根据系统可承受的检修备用容量充裕度指标 $MNEPCW=0.01$ 选取相应的检修备用容量作为评估得到的检修备用容量, 为 775 MW。

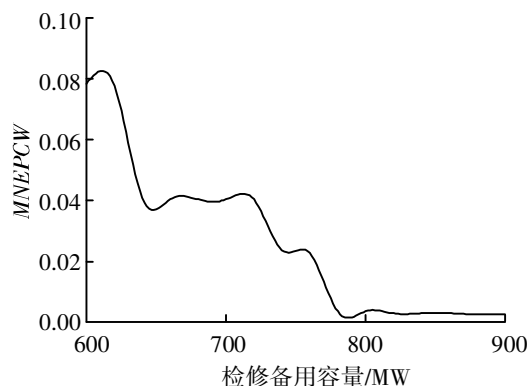


图 5 $MNEPCW$ 随检修备用容量变化曲线

Fig. 5 Curve between maintenance reserve capacity and $MNEPCW$

4.2 检修备用容量评估的应用

利用机组的修正强迫停运率进行发电系统装机控制时段充裕度评估, 选取指标为电力不足概率($LOLP$)、期望缺供电力($EDNS$)。在得到系统检修备用容量的同时, 可根据式(18)计算机组各时段的检修概率, 进而由式(20)修正机组的强迫停运率。以 1 台 300 MW 机组为例分析, 机组的初始强迫停运率为 0.006, 模拟后得到机组每旬的修正强迫停运率, 见表 6。

表 6 机组逐旬修正强迫停运率

Table 6 Modified FOR of units every ten days

时间	FOR	时间	FOR	时间	FOR
1	0.031 7	13	0.159 8	25	0.006 0
2	0.031 7	14	0.085 0	26	0.102 5
3	0.031 7	15	0.027 4	27	0.140 5
4	0.006 0	16	0.113 4	28	0.197 8
5	0.006 0	17	0.113 9	29	0.101 7
6	0.006 1	18	0.108 7	30	0.117 9
7	0.119 9	19	0.119 8	31	0.154 4
8	0.137 3	20	0.118 0	32	0.158 3
9	0.137 2	21	0.103 0	33	0.104 1
10	0.023 4	22	0.006 0	34	0.127 7
11	0.082 1	23	0.006 0	35	0.123 5
12	0.159 8	24	0.006 0	36	0.123 4

可见, 当计及机组逐旬检修概率后, 机组的强迫停运率会发生变化。检修概率大的旬相应的机组强迫停运率大, 显然, 如果机组检修概率为 1, 则机组的强迫停运率为 1。

将系统装机控制旬的持续负荷曲线分为 3 段, 即 $NL=3$, 见表 7。

表 7 负荷模型

Table 7 Load model

负荷/MW	61 200	58 000	55 000
概率	0.25	0.50	0.25

得到机组逐旬修正强迫停运率后, 可以应用非时序蒙特卡洛方法评估系统装机控制旬的发电充裕度; $LOLP$ 为 0.047 6 MW; $EDNS$ 为 18.607 4 MW。

4.3 风电对检修备用容量评估的影响

考虑不同风电场相关性对检修备用容量的影响, 为此, 考虑两个风电场之间的相关系数为 0.9、0.5、0.3 三种情况下系统评估得到的检修备用容量, 结果见表 8。

从表 8 可以看出, 随着风电场相关系数的降低, 系统需要的检修备用容量也逐渐降低。这是因为风电场相关系数越低, 风场出力波动性越小, 相应的等效负荷的波动性越小, 系统为了满足检修备用容

表 8 不同相关性下的检修备用容量

Table 8 Results of maintenance reserve capacity under different correlations

相关系数	检修备用容量/MW
0.9	775
0.5	765
0.0	740

量充裕度指标所需要设置的检修备用容量就越小。

考虑风电场装机容量对系统检修备用容量的影响,为此,需考虑两个装机 1 500 MW 风电场、装机 3 000 MW 风电场和装机 6 000 MW 风电场 3 种情况下系统评估得到的检修备用容量,结果见表 9。

表 9 不同风电装机下的检修备用容量

Table 9 Results of maintenance reserve capacity under different wind capacity MW

风电场 1	风电场 2	检修备用容量
0	0	810
1 500	1 500	790
3 000	3 000	775
6 000	6 000	600

从表 9 可以看出,随着系统风电装机容量的增大,系统所需要的检修备用容量逐渐减小。这是因为装机控制句系统为第 22 句,其风速较其他句小,因此,随着风电装机的增加,将风电等效为负的负荷后,系统峰荷与其他句负荷的差值越大,相应的应用等备用法在装机控制句安排的检修容量就越小,因此其检修备用容量就越小。

4.4 风电对机组修正强迫停运率的影响

为了确定风电对修正强迫停运率的影响,计算无风电接入情况下的系统修正强迫停运率,见表 10。

表 10 无风电时机组逐旬修正强迫停运率

Table 10 Modified FOR of units every ten days

时间	FOR	时间	FOR	时间	FOR
1	0.006 0	13	0.006 0	25	0.006 0
2	0.006 0	14	0.006 0	26	0.006 0
3	0.006 0	15	0.006 0	27	0.006 0
4	0.006 0	16	0.006 0	28	1.000 0
5	0.006 0	17	0.006 0	29	1.000 0
6	0.006 0	18	0.006 0	30	1.000 0
7	0.006 0	19	0.006 0	31	0.006 0
8	0.006 0	20	0.006 0	32	0.006 0
9	0.006 0	21	0.006 0	33	0.006 0
10	0.006 0	22	0.006 0	34	0.006 0
11	0.006 0	23	0.006 0	35	0.006 0
12	0.006 0	24	0.006 0	36	0.006 0

对比表 10 和表 6 可以看出,风电接入后对系统的修正强迫停运率有影响。在无风电情况下,确定机组检修位置,28、29、30 旬进行检修,其余旬不进行检修;风电接入后,由于系统等效负荷波动,机组的检修位置不确定,因此,机组在各旬的检修概率与没有风电情况下不同,相应计算得到的修正强迫停运率不同。

5 结论

文中考虑了机组检修需求不确定性以及风电加入系统后的随机性和间歇性对机组检修备用容量的影响,建立了检修备用容量评估模型,模型中处理了机组检修需求问题,并根据提出的检修备用容量充裕度指标选取相应的检修备用容量,利用机组检修概率对机组的强迫停运率进行修正,计算装机控制旬的发电充裕度,同时比较了发电场相关性和风电装机容量对检修备用容量的影响,所得结论如下:

1)风电接入系统后对系统的检修备用容量选取有一定的影响。风电场相关系数越大,系统所需检修备用容量越大;风电装机容量越大,系统所需检修备用容量越小。

2)在求解检修备用容量评估模型的同时,可以通过机组检修概率对机组的强迫停运率进行修正,进而进行随机生产模拟、发电可靠性、发输电可靠性计算和风险评估。

参考文献:

- [1] 刘振亚.中国电力与能源[M].北京:中国电力出版社,2012:105-106.
- [2] 中华人民共和国水利电力部. SD 131—1984 电力系统技术导则(试行)[S].北京:水利电力出版社,1984.
- [3] 中华人民共和国水利电力部. SDJ 161—1985 电力系统设计技术规程(试行)[S].北京:水利电力出版社,1985.
- [4] 中华人民共和国国家能源局. DL/T 5429—2009 电力系统设计技术规程[S].北京:中国电力出版社,2009.
- [5] 王海彪,郭瑞鹏,姜忠民,等.考虑大规模风电接入的发电机组检修计划最小失负荷期望模型[J].电力系统保护与控制,2013,41(4):26-32.
WANG Haibiao, GUO Ruipeng, JIANG Zhongmin, et al. Generation maintenance scheduling based on minimum loss of load expectation considering significant wind power penetration[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 26-32.
- [6] 张宏宇,印永华,申洪,等.考虑大规模风电调峰要求的系统机组检修计划[J].电力系统自动化,2012,36(16):25-30.

- ZHANG Hongyu, YIN Yonghua, SHEN Hong, et al. Generator maintenance scheduling of large-scale wind power integration considering peak shaving [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 25-30.
- [7] 广东电网公司电网规划研究中心, 西安交通大学. 电力系统规划中检修备用容量评估方法: 中国, CN201310269667.7 [P]. 2013-11-27.
- Guangdong Grid Planning Research Centre, Xi'an Jiaotong University. Maintenance reserve capacity evaluation method in power system planning: China, CN201310269667.7 [P]. 2013-11-27.
- [8] 西安交通大学. 含风电的电力系统规划中检修备用容量确定方法: 中国, CN201410138682.2 [P]. 2014-07-23.
- Xi'an Jiaotong University. Maintenance reserve capacity evaluation method in power system planning including wind power: China, CN201410138682.2 [P]. 2014-07-23.
- [9] FEIJOO A E, CIDRAÓS J, DORNELAS J. Wind speed simulation in wind farms for steady-state security assessment of electrical power systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(4): 1582-1588.
- [10] 别朝红, 王锡凡. 蒙特卡罗法在评估电力系统可靠性中的应用 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21(6): 68-75.
- BIE Chaohong, WANG Xifan. The application of Monte Carlo method to reliability evaluation of power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(6): 68-75.
- [11] 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 Yichun, DING Ming. Reliability assessment of wind power generation system based on Monte-Carlo simulation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12): 70-73.
- [12] 吴义纯. 含风电场的电力系统可靠性与规划问题的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- WU Yichun. Research on reliability evaluation and expansion planning of power system including wind farms [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006.
- [13] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 基于机会约束规划的风电穿透功率极限计算 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 32-35.
- LEI Yazhou, WANG Weisheng, YIN Yonghua, et al. Wind power penetration limit calculation based on chance constrained programming [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2002, 22(5): 32-35.
- [14] WANGDEE W, BILLINTON R. Considering load-carrying capability and wind speed correlation of WECS in generation adequacy assessment [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 734-741.
- [15] 雷亚洲. 随机规划理论在风电并网系统分析中的应用研究 [D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2001.
- LEI Yazhou. Application of chance constrained programming in wind power penetration [D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2001.
- [16] 宋晓通. 基于蒙特卡罗方法的电力系统可靠性评估 [D]. 济南: 山东大学, 2008.
- SONG Xiaotong. Study on reliability evaluation of power system based on Monte Carlo simulation [D]. Jinan: Shandong University, 2008.
- [17] BILLINTON R, LI Wenyuan. Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo methods [M]. America: America Plenum Press, 1994.
- [18] 石文辉, 别朝红, 王锡凡. 大型电力系统可靠性评估中的马尔可夫链蒙特卡洛方法 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 9-15.
- DAN Wenhui, BIE Chaohong, WANG Xifan. Applications of markov chain Monte Carlo in large-scale system reliability evaluation [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 9-15.
- [19] 余民, 杨旻宸, 蒋传文, 等. 风电并网后电力系统可靠性评估和备用优化研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 100-104.
- YU Min, YANG Minchen, JIANG Chuanwen, et al. Study on power system reliability and reserve optimization with wind power integration [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 100-104.
- [20] 吴昊, 张焰, 刘波. 考虑风电场影响的发输电系统可靠性评估 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 36-42.
- WU Hao, ZHANG Yan, LIU Bo. Reliability assessment of generation and transmission systems considering wind farm effects [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 36-42.
- [21] 王锡凡. 电力系统优化规划 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 190-191.

高玉洁(1969—), 女, 工程师, 主要从事电网规划设计、发电厂接入系统设计等工作。

张永凯(1990—), 男, 硕士研究生, 从事电力系统备用容量评估、电力系统可靠性评估方面的研究。

(编辑 赵彩莉)