

风电集群紧急功率控制方法研究

邢正军, 林 俐, 张东英

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

Research on Emergency Power Control for Wind Farms

XING Zhengjun, LIN Li, ZHANG Dongying

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

摘要: 在调度中心要求风电集群紧急切功率时, 需优化协调分配多个风电场的功率切除量。本文首先分析了风电场紧急功率切除的方式, 进而提出了基于切场组合、基于风电场切机、基于切场与场内切机相结合和基于风电场累计有功功率切除量排序的4种不同的紧急切功率分配算法; 其次以分配偏差量、风电场切场数等5个指标的加权组合构建综合评价指标以评估各算法的性能; 最后以某实际风电集群为例, 验证所提算法的有效性。分配结果和综合评价指标值表明4种分配算法都有各自的适用范围, 其中基于风电场累计有功功率切除量排序的方法综合指标值最小, 适用范围最大。

关键词: 风电集群; 紧急切功率; 风电出力分配; 风电场累计功率切除量; 综合评价指标

Abstract: When it is required to cut active power among wind farms in emergency situation, the coordination among wind farms is needed to allocate power cut amount. In this paper, the active power cut mode of wind farms is analyzed firstly, and four kinds of power allocation algorithms are proposed based on combination of cut wind farms, cut generators in wind farm, the combination of cut wind farms and cut generators in wind farm, and the ranking of accumulative active power cut amount in wind farm. Then, a comprehensive evaluation index is set up by weighted combination of five indicators, such as distribution deviation and the number of cut wind farms, to evaluate the performance of each algorithm. In the end, an actual wind power cluster is used as an example to verify the validity of proposed algorithms. Distribution results and comprehensive evaluation index values show that four kinds of allocation algorithms have different application scopes, in which the algorithm based on the ranking of cumulative power cut amount in

wind farms has smallest comprehensive evaluation index value and the widest application scope.

Keywords: wind farms; emergency power cut; wind power distribution; cumulative power cut amount of wind farms; comprehensive evaluation index

0 引言

随着风电并网比例的快速增加, 使得电力系统在紧急情况下必须考虑风电的切场或切机措施^[1-2]。文献[1-2]指出了严重故障后导致系统失稳的主要原因是故障过程中产生的加速能量和故障后外送通道输电能力的急剧下降, 对于风火打捆外送能源基地, 系统失稳后仅切除常规火电机组难以保证系统稳定运行或切除机组代价过大, 而且为保障故障后火电机组对系统频率和电压的控制能力, 火电机组的切机比例不能过高, 因此, 必须在此基础上切除一定容量的风电机组, 才能以较小的代价保持系统稳定运行。国家电网公司发布的《风电场接入电网技术规定》中明确指出: 在电网紧急情况下, 风电场应根据电网调度部门的指令来控制其输出的有功功率, 并保证风电场有功控制系统的快速性和可靠性^[3]。对于一个风电基地或集群而言, 如何在给定的时间内根据调度命令完成并网风电集群的紧急协调控制, 已成为当前必须解决的现实问题。

目前国内外关于风电的有功功率控制研究主要集中在风电场调频^[4-7]、风电场限出力控制策略^[8]、集群限出力控制策略^[9]和非紧急情况下风电场群有功功率协调控制策略等^[10-11], 对风电场或集群有功功率的紧急控制策略方面的研究还很少。文献[10]指出在电网紧急情况下, 需要削减风电出力才能保证电网的安全稳定, 此时集群风电有功智能

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)
(2011AA05A104)

控制系统根据调度人员输入的需降风电出力总量,立刻自动计算各风电场新的出力计划,并下发至各风电场执行,但文中并未对如何分配这一功率做讨论和介绍。

本文借鉴常规火电厂有功功率紧急控制,通过类比和分析给出风电集群的有功功率紧急控制方式。在此基础上,提出了4种以分配偏差量最小化为目标的风电集群有功切除量分配算法模型,并构建一系列评价指标对各种方法的优缺点做了对比分析。最后通过实际算例验证所提方法的有效性。

1 风电集群有功功率紧急控制方式

紧急控制的快速性要求必须选择快速的风电集群有功功率控制方式。通过介绍常规火电厂的有功功率紧急控制方式和风电集群有功功率紧急控制自身的特点,指出只有风电场切场或者风电场场内切机满足风电集群有功功率紧急控制的快速性要求。

1.1 常规火电厂有功功率紧急控制

对于常规火电厂,紧急情况下得到调度给定的功率切除量,需在给定的控制时间内完成功率切除。

紧急控制要求控制速度非常快,一般要求动作时间不大于0.3~0.4s,否则将无法维持系统稳定或需要花费较大的控制代价^[12]。同步机组参与有功功率紧急控制的措施主要包括两种:一种是快关阀门,一种是切机。由于水轮机调速器时间常数一般要比汽轮发电机大很多,快关阀门一般仅限于火电机组,利用快速瞬时关小气门减小原动机出力来改善系统稳定性^[13];而切机控制既可应用于火电机组又可应用于水电机组,通过断开火电机组或水电机组来实现。火电机组的短暂快关汽门允许汽门重新开至原来位置,而持续快关汽门控制汽门重新开至调整后的开度,使机组机械功率降到一个新的水平^[14]。对于一个实际电厂,火电机组快关气门可以在0.6~0.7s内将机组功率降为零^[15];而汽轮机能够在0.3s以内将所有气门关闭并切机^[16]。可见,火电机组切机可以在0.3s以内完成,而火电机组快关气门也能在0.3~0.4s内完成50%~60%的降出力。

对于紧急有功切除量的分配,火电机组一般可采取3种方式,即切机、快关气门以及综合考虑切机与快关气门的配合。

1.2 风电集群有功功率紧急控制的特殊性

根据常规火电厂有功功率紧急控制的要求,结合风电集群的自身特点,可知风电集群有功功率紧

急控制与风电集群限值控制、调整控制、斜率控制、差值控制以及调频控制^[17]有着很大的差异,其特殊性可总结如下:

① 时间尺度上,紧急控制要求在几百个毫秒内完成,只能通过切场或切机才能达到这一速度要求,而其他控制都在秒级甚至分钟级以上,可以通过转速控制或桨距角控制实现;

② 变量变化范围上,紧急控制涉及到切场或场内切机,一般来说有功功率变化总量较大,而其他控制一般是调节性的,变化总量较小,这一点可类比于常规系统的紧急切机和有功发电再调度^[18];

③ 对风功率预测的依赖性上,紧急控制由于时间尺度很小,可以认为在这一过程中风速没有发生变化,因而不需要风功率预测,而其他控制如不考虑风功率预测,则可能会造成风电的大量浪费;

④ 控制目标上,紧急控制的控制目标一般为切场切机总数最少和控制偏差量最小,其他控制目标一般为风电出力的最大化。

2 风电集群紧急有功切除量分配方法

大规模风电基地有功功率控制的目的是以保证电网安全稳定可靠运行为前提,实现风能资源的充分利用^[10]。在电网紧急情况下,需要通过切机、切场削减风电出力才能保证电网的安全稳定。对于给定集群切功率值,本文以分配偏差量 D_E 最小为目标,确定各风电场有功功率切除量,完成功率分配任务。

对于一个风电集群而言,紧急情况下风电集群有功功率分配方式可分为3种:切场、切机和切场切机相结合。下面是本文所提的4种分配方法。

2.1 基于切场组合的风电集群有功切除量分配

根据给定的切功率总量 ΔP ,当仅考虑切场时,在保证不欠切的前提下以 D_E 最小为目标,有功分配目标函数如下:

$$\min D_E = \min \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i P_{wi} - \Delta P \right\} \quad (1)$$

约束条件如式(2):

$$\Delta P \leq \sum_{i=1}^n \alpha_i P_{wi} \quad \alpha_i \in \{0,1\}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: P_{wi} 是风电场 i 的当前出力; n 为可参控的风电场总数; α_i 表示是否将风电场 i 切除; $\alpha_i = 1$ 表

示切除； $\alpha_i=0$ 表示不切除。

2.2 基于风电场切机的风电集群有功切除量比例分配

只考虑风电场切机时，根据给定的切功率总量 ΔP ，按各风电场当前出力占集群出力的比例分配功率切除量，如式所示：

$$\Delta P_{wi} = \frac{P_{wi}}{\sum P_{wi}} \Delta P \quad (3)$$

式中： ΔP_{wi} 为风电场 i 分配到的有功功率切除量。按此分配方法， D_E 为零。

各风电场以切机分配偏差量 C_i 最小为目标，目标函数如下：

$$\min C_i = \min \left\{ \sum_{j=1}^{n_i} \alpha_j P_{w_{gj}} - \Delta P_{wi} \right\} \quad (4)$$

约束条件如式(5)：

$$\Delta P_{wi} \leq \sum_{j=1}^{n_i} \alpha_j P_{w_{gj}} \alpha_j \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中： $P_{w_{gj}}$ 是参与切机的风电发电机有功功率； α_j 表示是否将风电机组 j 切除； n_i 表示风电场 i 可参与切机的风电机组数。

考虑到上述模型求解较为复杂，采用文献 [8] 中的优先顺序法，以 $P_{w_{gj}}$ 的大小排序对风电机组进行编号，大的排前 ($j=1, 2, \dots, n_i$)，结合约束条件(5)确定需要切机的风电机组，满足式(6)的 H 台风电机组全切。

$$\sum_{j=1}^{H-1} P_{w_{gj}} - \Delta P_{wi} < 0 \text{ 且 } \sum_{j=1}^H P_{w_{gj}} - \Delta P_{wi} \geq 0 \quad (6)$$

则有

$$C_i = \sum_{j=1}^H P_{w_{gj}} - \Delta P_{wi} \quad (7)$$

2.3 基于切场与场内切机相结合的风电集群有功切除量分配

基于切场和场内切机相结合的风电集群有功功率分配，就是要将风电集群切功率总量 ΔP 的大部分分配给切场以减轻风电场切机的压力，而将切场分配偏差量 $\Delta P'$ 分配给切机控制以减小分配偏差量。在实际分配过程中，要求风电场切场数、参与控制的风电场数和风电机组切机数尽可能小；然而，尽可能少的风电机组切机可能与尽可能少的风电场参与控制相悖，为解决这一矛盾，考虑在参控风电场最少的基础上实现风电机组切机数最小。

基于上述分析，以各风电场有功功率 P_{wi} 大小排序确定风电场切场分配序列(大的排前)，按此

分配序列即可保证切场数最少。选择满足式(8)的风电场切机即可实现在参控风电场最少的基础上实现风电机组切机数最小，切机控制计算方法与上一小节相同。

$$\max \left\{ \frac{P_{wi}}{n_j} \mid P_{w_j} - \Delta P' \geq 0, j = L, L+1, \dots, n \right\} \quad (8)$$

式(8)表示在剩余的 $(n-L+1)$ 个风电场中选择机组平均出力最大的风电场参与切机。

据此，可建立风电集群切场与场内切机相结合的有功功率分配流程图，如图 1 所示，图中 P_{d1} 和 P_{d2} 分别为风电场切场分配功率和、切机风电场切机功率和， L 和 M 是循环变量。可见，上述分配过程的分配偏差量 D_E 为零。

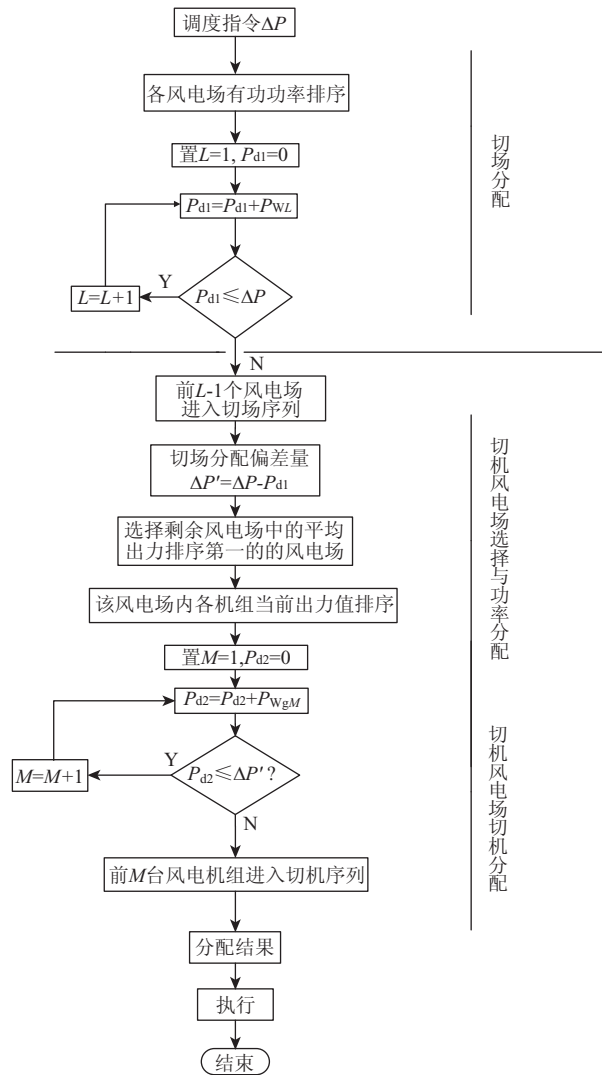


图 1 基于切场与场内切机相结合的风电集群有功切除量分配方法

2.4 基于风电场累计有功功率切除量排序的风电集群有功切除量分配

在上一小节的风电集群有功切除量分配中,未考虑各风电场累计有功功率切除量,这可能造成某些风电场多次被切除或风电场多次切机,而另一些风电场几乎不参与控制的情况,不利于各风电场之间的横向比较^[19]。据此,本节提出一种基于风电场累计有功功率紧急切除量 $P_{i\Sigma QR}$ 的优先排序分配法,通过优先控制排序在前的风电场,以力求分配的均衡。风电场累计有功功率紧急切除量,即在一个时间周期 T 内,风电场已经切除的有功功率总量。其计算方法如下:

$$P_{i\Sigma QR} = \sum_{j=1}^n \Delta P_{WFj} \quad (9)$$

式中: n 代表风电场 i 在一个时间周期 T 内已经参与的紧急有功控制次数, ΔP_{WFj} 表示其在第 j 次控制中分配的有功切除量。

与 2.3 小节相比,本节在切场和场内切机的风电场选择中考虑了各风电场的累计有功功率紧急切除量,以式(10)为指标确定风电场切场分配顺序和切机风电场,其他基本和 2.3 小节一致。

$$g(P_{Wi}, P_{i\Sigma QR}) = \alpha \left(1 + \frac{\Delta P_{Wi}}{P_{Base}}\right) + \beta \left(10 + \frac{P_{Base}}{P_{i\Sigma QR}}\right) \quad (10)$$

式中: α, β 为非负整数,且 $\alpha + \beta = 1$,若 $P_{i\Sigma QR} = 0$, $\alpha = 1$,否则, $\alpha = 0$; P_{Base} 为有功功率基准值。

3 分配方法的评价

3.1 各种分配方法的单项指标比较

由文献 [20] 知,在建立各种风电集群紧急切功率分配方法评价指标体系时,需要结合风电集群自身的特点,做到既要尽可能全面地反映各种分配方法实际情况,又要考虑到数据采集难度、计算量等。据此,考虑到 4 种方法都是过量分配,建立分配偏差量 D_E 、风电场切场数 N_{cwf} 、场内切机风电场数 N_{cwg} 、算法求解难度 S_C 、累计有功切除量方差 E_B 这 5 个指标对各种分配方法进行比较,比较结果如表 1 所示。其中 E_B 计算公式如式(11)

$$E_B = \sum_{i=1}^n (\Delta P_{av} - \Delta P_i)^2 \quad (11)$$

式中: ΔP_{av} 是各风电场期望分到的累计切功率总量,为各风电场平均分配时的累计切功率总量, ΔP_i 是各风电场实际分到的累计切功率总量。

表 1 4 种分配方法对比

指标对比	方法编号			
	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
D_E	大	小	小	小
N_{cwf}	较多	最少	次少	较多
N_{cwg}	最少	多	较少	较少
S_C	困难	简单	简单	简单
E_B	中	小	大	小

可见,4 种方法各有优劣,无法通过表 1 直接确定最佳的分配方法。

3.2 综合评价指标

为了确定综合最佳的分配方法,必须考虑 3.1 小节中的各项指标的重要性,通过不同指标的加权组合来得到各种分配方法的综合指标,从而确定最佳的分配方法。

在前述 5 项指标中,首要考虑的应当时间紧迫性,只有满足时间紧迫性要求才能保证安全;其次需要考虑分配偏差量,实现风电的最大化利用是风电基地有功功率控制的控制目标^[10];然后需要考虑的是各风电场尽可能均衡分配调度下发紧急切功率指令值;最后考虑调度希望尽可能少的风电场参与控制,同时兼顾切场比场内切机代价高。据此可知,5 大指标中 S_C 最重要, D_E 次之, E_B 再次之, N_{cwf} 和 N_{cwg} 重要程度最低;相应的权重排序为 $k_{SC} > k_{DE} > k_{EB} > k_{N_{cwf}} > k_{N_{cwg}}$ 。

对比文献 [20] 中配电网规划的综合评价指标体系,为建立风电集群切功率分配算法综合评价指标,还需完成评分标准选择以及指标权重设定这两个任务。其中,评分标准是通过一定的标度体系,将各种原始数据转换成可直接比较的规范化格式;而指标权重则是反映了同层指标之间的相互重要性关系,采用归一化的向量来表示。

这里,将各单项指标中的非零最优值作为基准 (D_E 除外)。对于 D_E ,只有方法 1 不为 0 且一般较大,不适合作为基准值,这里取 10MW 为 D_E 基准值。

对于指标权重,3.1 小节已经对各项指标的重要性进行了定性分析,尚缺乏的只是具体的指标权重值。文献 [20] 指出采用专家群体决策的方法来确定同层属性间的权重,以量化描述同级指标之间的重要程度高低。可见,具体的指标权重值也可以通过专家群体决策给出。

基于以上分析，可构建如下综合评价指标 C ：

$$C = k_{SC} S_C^* + k_{DE} D_E^* + k_{EB} E_B^* + k_{N_{cwf}} N_{cwf}^* + k_{N_{cwg}} N_{cwg}^* \quad (12)$$

式中： $k_{SC} + k_{DE} + k_{EB} + k_{N_{cwf}} + k_{N_{cwg}} = 1$ ，“*”指规范化格式下的相对指标。

综合评价指标 C 越小，方案越优，适合范围越大。

4 算例与分析

4.1 仿真算例

本文策略应用到某实际风电集群系统中，该风电集群装机容量为 3 516MW，由 16 个装机容量为 201MW 的风电场和 1 个装机容量为 300MW(桥东二)的风电场组成，设所有风电机组均采用 GE 1.5MW 的双馈感应发电机，风电集群内部接线图如图 2 所示。风电集群内的风电场投运情况与风电出力如表 2 所示。

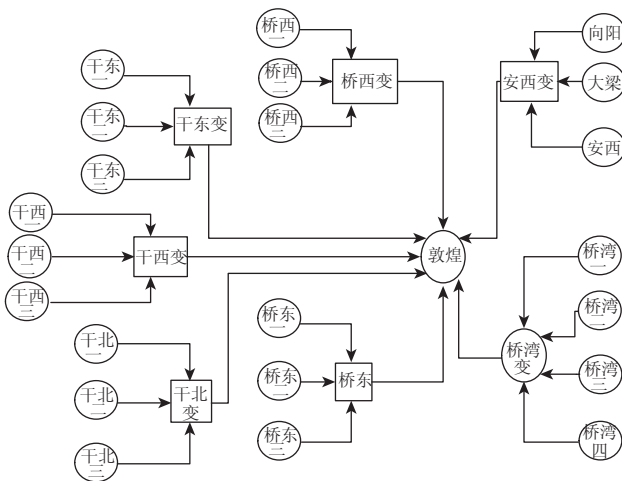


图 2 风电集群风电场接线图

这里考虑先后连续 7 次的风电集群紧急功率控制(按照先后顺序记作算例 1 至算例 7)，采用 4 种分配方法对这 7 个算例进行分配。其中，假定初始各风电场累计有功功率紧急切除量都为零。 C 各项指标权重由专家群体决策给出，分别为 0.62、0.18、0.1、0.07 和 0.03。

算例 1：在集群外部 750kV 线路(河西至武胜)施加三相短路故障，持续 0.1s 后切除。要求风电集群切除功率 250MW，仅需计算前 3 种分配算法(记作方法 1~3)的分配结果，第 4 种分配方法结果与方法 3 相同，各分配方法的风电场切场切机情况如表 2 所示，4 种分配方法的指标对比如表 3 所示。

表 2 风电场投运情况与算例 1 下各种分配方法的切场切机情况

风电场	投运标志	有功功率/MW	方法 1	方法 2	方法 3	
			切场 风电场	切机 风电场	切场 风电场	切机 风电场
干东一	F	—	—	—	—	—
干东二	T	158.5	0	1	8	0
干东三	T	100.5	0	1	10	0
干西一	T	40.5	1	1	11	0
干西二	T	140.5	0	1	9	0
干西三	T	170	0	1	4	0
干北一	F	—	—	—	—	—
干北二	T	180	1	1	1	1
干北三	F	—	—	—	—	—
桥西一	T	21	1	1	12	0
桥西二	T	163	0	1	6	0
桥西三	T	160.5	0	1	7	0
桥东一	T	168	0	1	5	0
桥东二	T	173	0	1	3	0
桥东三	F	—	—	—	—	—
桥湾一	F	—	—	—	—	—
桥湾二	F	—	—	—	—	—
桥湾三	T	176	0	1	2	0
桥湾四	F	—	—	—	—	—
风电集群	T	1 651.5	—	—	—	—

注：“F”表示未投运，“T”表示已投运，“1”表示该风电场参与控制，“0”表示该风电场不参与控制，“—”表示无此项。

表 3 算例 1 下的 4 种分配方法指标值对比

指标对比	方法			
	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
D_E /MW	8.5	0	0	0
N_{cwf}	3	0	1	1
N_{cwg}	0	12	1	1
S_C	困难	简单	简单	简单

算例 2~7(记为 C2~C7)：前文给出了算例 1 的详尽过程，为方便起见，此处只给出调度指令值和各算例的结果，调度指令值按算例编号依次为 100MW、150MW、300MW、400MW、500MW 和 671MW，结果如表 4、5、6 所示。表 4 给出了各算例中考虑风电场累计有功功率切除量的各风电场参与控制的顺序，表 5 给出了 4 种分配算法下的各风电场所有算例累计功率切除量，表 6 给出了 4 种分配算法的各单项指标值、单项指标相对值及综合指标值。

从表 2 可见，对于算例 1，方法 1 的切场数和

方法2的切机风电场数较大,分别为3个和12个。

从表3可见,4种方法各有优劣,如方法1的 N_{cwg} 最少,但其他指标较差,方法2在 N_{cwf} 、 S_C 和 D_E 这3个指标上几乎是最优的,但对于 N_{cwg} 却较差。

对于风电场参控顺序,方法1和方法2没有控制顺序可言,而方法3和4分别从风电场出力水平和累计切除功率角度确定风电场参与控制的顺序。如果风电集群内各风电场出力不变,则方法3的控制顺序是固定的;而对于方法4,控制顺序主要取决于各风电场的累计切除功率,变化较为频繁,如表4所示。

表4 方法4的各算例风电场参与控制的顺序

风电场排序	算例编号					
	C2	C3	C4	C5	C6	C7
千东二	6	5	4	2	9	7
千东三	8	7	6	4	1	3
千西一	9	8	7	5	2	2
千西二	7	6	5	3	5	11
千西三	2	1	11	10	8	6
千北二	12	12	12	12	12	10
桥西一	10	9	8	6	3	1
桥西二	4	3	2	9	7	5
桥西三	5	4	3	1	10	8
桥东一	3	2	1	11	11	9
桥东二	1	11	10	8	6	4
桥湾三	11	10	9	7	4	12

表5 各风电场所有算例累计功率切除量 MW

累切功率	方法			
	方法1	方法2	方法3	方法4
千东二	634	227.55	0	161.5
千东三	402	144.28	0	201
千西一	0	58.14	0	81
千西二	281	201.71	0	221.5
千西三	0	244.06	142	320
千北二	540	258.42	1 150	180
桥西一	42	30.15	0	42
桥西二	163	234.01	0	295
桥西三	160.5	230.42	0	160.5
桥东一	168	241.19	0	168
桥东二	0	248.37	361	294.5
桥湾三	0	252.68	708	246
ΔP_{av}	137.63	137.63	137.63	137.63

从表5可知,在所有算例下各风电场累计功率切除量方面,方法2和方法4各风电场分配相对平均,而方法1和方法3各风电场之间相差较大。

从表6可见,4种分配方法的综合指标优劣排序如下:方法4>方法2>方法3>方法1。

表6 所有算例下的各项指标值、指标相对值和综合指标值

指标	方法			
	方法1	方法2	方法3	方法4
S_C^*	10	1	1	1
D_E/MW	20.5	0	0	0
D_E^*	2.05	0	0	0
E_B/MW^2	585 730	110 150	1 551 700	121 590
E_B^*	5.32	1	14.09	1.10
$N_{\text{cwf}}/\text{个}$	20	0	9	15
N_{cwf}^*	2.22	0	1	1.67
$N_{\text{cwg}}/\text{个}$	0	84	7	7
N_{cwg}^*	0	12	1	1
C	7.28	1.08	2.13	0.88

注:为便于量化 S_C ,这里简单认为求解困难的算法是求解简单算法的10倍。

4.2 结果分析

4种方法中,基于切场组合的方法控制简单,但容易造成过切;基于风电场切机的方法将集群有功切除量平均分配到各风电场,避免了过切,是一种较为精细的控制方法,适合在风电场中公平分配有功切除量的场合,但控制相对复杂;基于切场与场内切机相结合的方法综合了前两种方法的优点,控制较为简单且避免了过切,但不适合在风电场中公平分配有功切除量的情况;基于风电场累计有功功率切除量排序的方法,在基于切场与场内切机相结合的方法基础上考虑了在各风电场中公平分配有功切除量,具有最优的综合指标值和较大的适用范围。

5 结论

风电并网比例的快速增加,使得电力系统在紧急情况下必须考虑风电的切场或切机措施。针对风电集群紧急有功切除量分配问题,本文提出了基于切场组合的、基于风电场切机的、基于切场与场内切机相结合的和基于风电场累计有功功率切除量排

序的4种风电集群有功切除量分配算法, 构建了评价分配算法的单项指标和综合指标。最后采用某实际风电集群系统, 仿真验证了各分配算法的有效性。仿真结果表明: 4种分配方法的适用范围不同, 方法1适用于不考虑风电场间公平分配、对分配精度要求不高和要求控制简单的场合; 方法2适用于不考虑风电场间公平分配和分配精度要求高的场合; 方法3适用于不考虑风电场间公平分配、分配精度要求高和要求控制较为简单的场合; 方法4适用于考虑风电场间公平分配、分配精度要求高和要求控制较为简单的场合。可见, 基于风电场累计有功功率切除量排序的分配方法由于计及了风电场之间的公平分配、避免了过切并且控制相对简单, 具有较大的适用范围。

参 考 文 献

- [1] 丁剑, 邱跃丰, 孙华东, 等. 大规模风电接入下风电机组切机措施研究(英文) [J]. 中国电机工程学报, 2011(19): 25-36.
- [2] 陈树勇, 陈会员, 唐晓骏, 等. 风火打捆外送系统暂态稳定切机控制 [J]. 电网技术, 2013(2): 514-519.
- [3] 国家电网公司. 风电场接入电网技术规定 [Z]. 中国: 北京, 2006.
- [4] 林俐, 王世谦, 谭娟. 计及系统调频需求的风电场有功调整方法 [J]. 中国电力, 2011(9): 22-25.
- [5] Rodriguez-Amanedo JL, Arnalte S, Burgos JC. Automatic generation control of wind farm with variable speed wind turbines. IEEE Trans Energy Convers, 2002, 17(2): 279-284.
- [6] Liu Junqiao, Rosyadi M, Takahashi R, et al. A new pitch control system of wind turbine to damp power system frequency fluctuations [J]. Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2012 International Conference on, 2012, 1(15): 11-14.
- [7] 乔颖, 鲁宗相. 考虑电网约束的风电场自动有功控制 [J]. 电力系统自动化, 2009(22): 88-93.
- [8] 林俐, 谢永俊, 朱晨宸, 汪宁渤. 基于优先顺序法的风电场限出力有功控制策略 [J]. 电网技术, 2013(4): 960-966.
- [9] 王世谦. 基于双馈风电机组的风电场有功功率控制策略研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [10] 行舟, 陈永华, 陈振寰, 等. 大型集群风电有功智能控制系统控制策略(一)风电场之间的协调控制 [J]. 电力系统自动化, 2011(20): 20-23, 102.
- [11] Xu Rui, Gao ZongHe, Teng Xianliang. Real-time dispatching and coordinated control of large capacity wind power integration. Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on, 16-20 Oct. 2011, 49-53.
- [12] 王俊. 电力系统实时紧急控制的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [13] 汤涌, 卜广全, 侯俊贤. PSD-BPA 暂态稳定程序用户手册. 中国电力科学研究院, 2005.
- [14] 蒙定中. 沙角C厂2号汽轮发电机组的快关试验 [J]. 电网技术, 1999(12): 11-15, 23.
- [15] 张友. 快关汽门提高电力系统稳定水平的研究与试验 [J]. 电网技术, 1996(7): 19-21, 27.
- [16] 房国成, 赵一丹. 1000MW超超临界机组汽轮机汽门关闭时间调整 [J]. 东北电力技术, 2010(9): 11-14.
- [17] Anca D Hansen, PoulSørensen, Florin Iov, FredeBlaabjerg, Centralised power control of wind farm with doubly fed induction generators, Renewable Energy, 2006, 31(7): 935-951.
- [18] 丁明, 李生虎, 吴红斌, 等. 基于充分性和安全性的电力系统运行状态分析和量化评价 [J]. 中国电机工程学报, 2004(4): 47-53.
- [19] 刘伟, 黄越辉, 刘纯, 等. 风电场功率分配算法 [J]. 中国电力, 2011(8): 53-56.
- [20] 肖峻, 崔艳妍, 王建民, 等. 配电网规划的综合评价指标体系与方法 [J]. 电力系统自动化, 2008(15): 36-40.

收稿日期: 2013-09-24

作者简介:

邢正军(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制, E-mail: meimuxiaozi@126.com;

林俐(1968—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统分析、运行与控制及风电并网, E-mail: linli@ncepu.edu.cn.

(责任编辑: 林海文)