

考虑风电参与的黑启动方案

顾雪平, 李新军, 杨超, 李少岩

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要:风电具有启动功率小、启动速度快的特点,安全、稳定地利用风电将有效加快电力系统恢复进程。考虑系统调频能力和机组爬坡能力约束,提出基于机会约束规划模型的风电参与黑启动最佳接入量评估方法,并对风电接入时机进行评估。为了有效发挥风电的作用,提出考虑风电参与黑启动方案的优化方法,对风电接入和负荷恢复进行分时步协调优化,制定出风电参与的最优黑启动方案。以含风电的IEEE 39节点系统为算例验证所提方法的可行性和有效性。

关键词:黑启动;风电接入评估;系统调频能力;负荷恢复;多目标优化

中图分类号:TM 721;TM 614

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201912018

0 引言

随着电力系统的大规模互联,其供电可靠性和运行经济性得到提高,但电网结构和动态性能也逐渐变得复杂。近年来,可再生能源发电量的比重不断增加,在大规模接入电网时,其固有的随机性、间歇性和波动性将给电力系统的稳定、安全运行带来更多的隐患,若一些局部故障不能快速处理,可能导致事故的扩大,进而引发电网的大停电事故。因此,在发生大停电事故时,为了减少停电损失以及快速恢复系统,有必要事先制定黑启动方案^[1-2]。

由于水电机组、燃气轮机组等具有启动功率小、启动时间短和能够自启动的特点,在制定黑启动方案时,通常将其作为黑启动电源。风电等新能源虽然启动速度快、启动功率小,但考虑到其出力不稳定,常规黑启动方案中并未涉及风电。而随着智能电网环境下风电运行控制技术的提升和风电渗透率的不断提高^[3-4],研究风电参与系统黑启动的理论方法和实现技术变得十分必要,特别是一些缺乏水电的地区,若风电能够安全、平稳地参与黑启动,可以极大加快系统的恢复。

随着风电大规模并网,风电相关技术规定也逐渐完善,为风电的稳定控制和运行提供了规范指导。为使风电能够成为黑启动电源,国内外学者进行了相关研究。文献[5-9]对风电参与系统调频的策略及调频能力进行详细介绍,研究表明双馈和直驱风电机组通过结合虚拟惯性、超速和变桨控制策略,使风电机组具有短期频率响应能力。文献[10]对柴油

发电机配合风电场黑启动时的不同调频策略进行深入研究,仿真验证了方案的可行性。文献[11-12]验证了风储系统作为黑启动电源的可行性。这些研究表明风电具有参与系统黑启动的可能性。

文献[13]总结风电参与黑启动需要考虑的相关因素。文献[14]发现系统频率是影响风电接入量的重要因素,通过配备储能有助于风电参与黑启动,但考虑到现阶段储能的控制技术不成熟,成本过高,通过配备储能的方式存在一定的局限性。文献[15]总结了风电参与微网黑启动的一般步骤和注意事项。文献[16]证明了风电接入能够加快黑启动进程,但未深入讨论风电与系统恢复协调优化。

上述研究表明了风电参与黑启动的可行性和重要性,但对于风电接入量的确定以及风电如何安全、有效参与黑启动并未进行深入研究。因此,本文首先提出基于系统调频能力和机组爬坡能力的风电参与黑启动最佳接入量的计算方法,明确风电的接入时机;其次,为保证风电安全、稳定地接入,需对黑启动过程中待恢复机组和负荷分时步进行优化,构建风电参与黑启动方案的优化模型;最后对含有风电的IEEE 39节点系统进行分析,制定出风电参与的黑启动方案BSSW(Black Start Scheme based on Wind power),并在PSCAD/EMTDC软件上根据BSSW搭建黑启动模型进行仿真验证。

1 黑启动过程中风电接入评估

由于风电出力固有的波动性、间歇性和随机性,大规模风电接入电网将引起系统频率和电压的持续波动。尤其是在系统恢复初期,系统规模较小,并网机组较少,风电的波动性会给黑启动过程带来进一步的负面影响,而频率波动影响是系统安全恢复的主要问题^[14]。因此,风电接入带来的有功波动,必须能被已并网机组进行有效调节,维持系统频率稳定。

对于网络结构和负荷相对稳定的电网,现有研

收稿日期:2019-03-03;修回日期:2019-10-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677071);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2018MS085)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677071) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2018MS085)

究都是采用系统可接纳的风电总装机容量与系统最大负荷比值来表征系统接纳风电的能力^[17-18],而在系统恢复过程中,系统强度不断增强,负荷逐步恢复,系统接纳风电的能力也在持续增长,在黑启动阶段系统接纳风电的能力为:

$$R_{BSw} = P_{R\Sigma\max} / P_{G\Sigma} \quad (1)$$

其中, $P_{R\Sigma\max}$ 为黑启动某时段系统接纳最大风电总接入容量; $P_{G\Sigma}$ 为黑启动某时段系统已并网发电机总容量。

电网稳定运行时,限制风电接入的因素主要有系统频率、电压和潮流等,而系统恢复过程中,限制风电接入的最关键因素是系统频率^[14,19],电压、潮流等问题可通过负荷恢复优化解决,通过协调风电接入和机组、负荷恢复,保证风电接入后系统稳定运行。

1.1 风电接入量的求解

为保证风电安全、稳定、有效地接入,已并网机组须能有效调节风电带来的有功波动,系统调频能力和常规机组爬坡能力是限制风电接入量的主要因素。本文考虑风电对电网运行影响最恶劣的情况进行讨论,即风电出力连续跌落或连续上升的情况,这是对系统调频能力和机组爬坡能力最大的挑战。

在求解风电的最佳接入量时,首先需要构建大量风电出力场景,由于预测的风况可能不准确且数据量较少,由此考虑利用大量历史风况来求解。一般情况下,黑启动过程耗时为1~3 h,因此,利用移动时间窗的方法,从历史风速数据中截取出大量3 h风速片段。本文认为在大多数的历史风况下风电接入量都能满足约束条件,则认定系统能够接入该容量风电。据此,建立包含系统调频能力和机组爬坡能力约束条件的机会约束规划模型^[20]:

$$\begin{cases} \max P_{R\Sigma} = \sum_{i=1}^m P_{Ri} \\ \text{s.t. } \text{Prob}\left\{\left|\Delta P_{wcT}\right| \leq \left|\Delta f\right| K_s\right\} \geq \alpha \\ \text{Prob}\left\{\left|\frac{\Delta P_{wc}}{\Delta T_{wc}}\right| \leq K_p\right\} \geq \beta \end{cases} \quad (2)$$

其中, Prob 函数表示返回区域中的数值落在指定区间内的对应概率; P_{Ri} 为第 i 个风电场并网风电机组容量总和; $P_{R\Sigma}$ 为风电接入总量; ΔP_{wcT} 为风电出力连续 10 min 变化量^[14]; m 为待并网风电场数量; ΔP_{wc} 为风电出力连续变化量; ΔT_{wc} 为 ΔP_{wc} 对应的变化时间; Δf 为黑启动阶段系统最大能承受的频率偏差,本文取值为 0.5 Hz; K_s 为某一时步系统调频能力值^[21]; K_p 为某一时步系统已并网机组总的爬坡能力值; α 、 β 为置信水平。

对于式(2)中的机会约束,通过对历史风速片段进行概率统计,校验其是否得到满足^[20]。以系统调频能力约束为例,假定在风电接入量为 $P_{R\Sigma}$ 时,用 n

个历史风速片段进行校验,如果有 n' 个片段能够满足系统调频能力约束,则利用大数定律,以 n'/n 估计 $\text{Prob}\left\{\left|\Delta P_{wcT}\right| \leq \left|\Delta f\right| K_s\right\}$ 的值,当且仅当 $n'/n \geq \alpha$ 时满足调频能力约束。但考虑到黑启动阶段电网对风电接入有着更严格的要求,在本文中 α 、 β 均取值为 0.98,随着系统恢复规模逐步增大,可放宽约束标准。通过遗传算法即可求得黑启动过程中各时步风电最佳接入量,从而能确定各时步风电机组的出力情况。

1.2 风电接入时机的评估

为保证风电在参与黑启动时能够达到一个“积极、正面”的有效作用,本文分别从风电和黑启动系统 2 个方面对风电参与黑启动的时机进行评估。

(1) 风电接入时黑启动系统的要求。

a. 系统恢复至一定容量规模。黑启动初期,系统网架规模较小,能参与调频的机组只有黑启动电源,为保证风电接入后系统频率稳定,本文认为黑启动电源至少成功启动 1 台被启动机组后,形成双机或多机并列运行的黑启动小系统才能考虑接入风电。

b. 系统恢复至风电并网点。风电无法实现自启动,必须通过电网给其供电才能够启动,因此,风电接入电网需等到系统网架恢复至风电并网点。

(2) 风电接入时风电的自身条件。

风电持续出力要大于某一定值。为保证风电接入对系统恢复有积极作用,对未来 30 min 预测风速进行分析^[22],当风电场出力达到额定容量的 10% 以上时才考虑风电接入。

1.3 风电接入的决策流程

随着系统的逐步恢复,需要不断对风电参与黑启动进行动态评估,更新风电接入量。因此,根据系统恢复情况和未来风电运行状况,制定系统黑启动每一时步风电接入的决策流程,如图 1 所示。

2 BBSW 制定的优化方法

系统恢复前期,风电的参与和系统逐步恢复是一个相辅相成的关系:风电参与主要是尽可能多地为系统提供启动功率,恢复失电机组和重要负荷,加快系统恢复;而系统的逐步恢复,使系统强度得到提升,提高了风电的接纳能力。

在制定黑启动方案时,为保证风电安全、高效地参与,本文考虑将风电与系统恢复进行协调优化。黑启动过程是一个多目标多约束的连续过程,为尽可能减少风电出力的不确定性对黑启动恢复的影响,且风功率预测时长越短越准确,因此,分时步进行优化才能保证风电的充分利用和系统安全稳定运行。

2.1 优化模型的建立

2.1.1 目标函数

风电参与黑启动时,需对黑启动方案各时步失

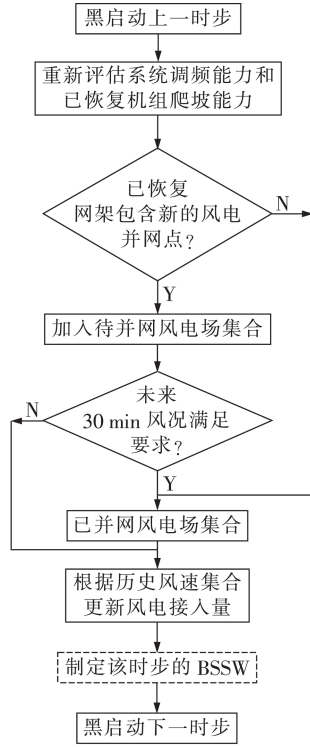


图 1 风电接入决策流程

Fig.1 Decision-making process for wind power access

电机组和重要负荷恢复进行优化^[23]。由于风电启动时间远小于常规机组恢复时间,本文以某时步内常规机组恢复时间近似作为系统恢复时步的步长。考虑到风电可能处于参与或不参与状态,本文借鉴传统黑启动方案 TBSS (Traditional Black Start Scheme) 的研究结果确定失发电机组的恢复顺序,侧重研究风电接入后各时步的负荷恢复优化,恢复原则是:通过负荷恢复优化,使系统各节点电压偏差尽可能地小,在保证系统安全稳定运行的同时有利于下一时步负荷恢复和风电接入;为充分利用风电参与黑启动的价值,尽可能恢复重要度较高的负荷(一般负荷重要度高则节点重要度也高);充分利用风电和已恢复机组提供的启动功率,尽可能恢复更多负荷量。综合考虑以上因素,建立各时步负荷恢复目标函数:

$$\begin{cases} \min(f_1, f_2, f_3) \\ f_1 = \sum_{g=1}^{n_L} |U_g - U_N| \\ f_2 = -\sum_{g=1}^{n_L} c_g K_g \\ f_3 = -\sum_{g=1}^{n_L} c_g \Delta L_g \end{cases} \quad (3)$$

其中, f_1 为本时步负荷投入后各节点电压与额定电压差绝对值之和; U_g 为节点 g 电压标幺值; U_N 为节点电压额定值; n_L 为本时步系统中全部待恢复的负荷节点总数; f_2 为本时步待恢复节点负荷重要度之和;

c_g 表示节点 g 负荷是否投入,取值为 1 表示投入,为 0 表示不投入; K_g 为节点 g 负荷重要度^[23]; f_3 为本时步负荷恢复总和; ΔL_g 为本时步节点 g 重要负荷恢复量^[24]。

2.1.2 约束条件

风电接入后的负荷恢复主要考虑的约束有启动功率约束、节点电压与潮流约束(常规机组出力约束、线路输电功率约束)和本时步风电最大最小出力状况潮流约束。

(1) 启动功率约束。

风电与已并网发电机组出力之和应大于已恢复负荷量和待恢复负荷量之和,通过第 1 节的风电评估模型更新该时步风电机组的最佳接入量,根据预测的风速计算该时步风电平均出力作为风电出力值。

$$\sum_{i=1}^{n_w} \bar{P}_{wi} + \sum_{j=1}^{n_G} P_{Gjmax} \geq \sum_{g=1}^{n_L} c_g \Delta L_g + L_Y \quad (4)$$

其中, n_w 为已并网风电场数量; $\bar{P}_{wi}$ 为本时步内第 i 个风电场出力值; n_G 为已并网的常规发电机组总数; P_{Gjmax} 为本时步第 j 台发电机的最大出力值; L_Y 为本时步前已恢复负荷量。

(2) 节点电压与潮流约束。

风电接入后各节点电压值和潮流必须满足系统稳定运行约束条件:

$$\begin{aligned} \text{PF}(U_g, P_{Gj}, Q_{Gj}, P_{Lk}, \bar{P}_{wi}) &\leq 0 \quad \Leftrightarrow \\ \begin{cases} U_{gmin} \leq U_g \leq U_{gmax} & g = 1, 2, \dots, n_L \\ P_{Gjmin} \leq P_{Gj} \leq P_{Gjmax} & j = 1, 2, \dots, n_G \\ Q_{Gjmin} \leq Q_{Gj} \leq Q_{Gjmax} & j = 1, 2, \dots, n_G \\ P_{Lk} \leq P_{Lmaxk} & k = 1, 2, \dots, n_0 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\text{PF}(U_g, P_{Gj}, Q_{Gj}, P_{Lk}, \bar{P}_{wi}) \leq 0$ 为潮流方程的概念表达式; U_{gmax} 、 U_{gmin} 分别为系统稳定运行时节点 g 电压上、下限值; P_{Gjmin} 为系统稳定运行时第 j 台发电机的有功功率最小值; Q_{Gjmin} 、 Q_{Gjmax} 分别为系统稳定运行时第 j 台发电机的无功功率最小值和最大值; P_{Lk} 为第 k 条支路的传输功率值; P_{Lmaxk} 为第 k 条支路的传输功率值极限; n_0 为已恢复线路总数。

(3) 本时步风电最大最小出力状况潮流约束。

由于本文采用预测的风速计算本时步风电平均出力作为风电出力值,忽略了风电出力极限状况下对系统运行的影响,因此,考虑通过对该状况进行简单快速潮流计算进行校验,在保证系统稳定运行的同时有效、快速制定出风电参与黑启动方案。

$$\begin{cases} \text{PF}(U_g, P_{Gj}, Q_{Gj}, P_{Lk}, P_{wi}^{max}) \leq 0 \\ \text{PF}(U_g, P_{Gj}, Q_{Gj}, P_{Lk}, P_{wi}^{min}) \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, P_{wi}^{max} 、 P_{wi}^{min} 分别为风电最大、最小出力。

2.2 模型求解

针对负荷恢复的智能优化这一多目标多约束问题,本文采用快速非支配遗传算法 II^[23,25] (NSGA-II) 进行求解。通过引入快速非支配排序算法、个体拥挤度距离算子和精英策略, NSGA-II 是一种求解多目标优化问题的 Pareto 最优解集的优秀进化算法,能够有效降低计算复杂度,所得解集分布均匀,避免了目标偏好性,收敛好。

在求解本文的多目标优化模型时,首先将模型转化为由目标函数和约束条件组成的多目标 0/1 背包问题,通过 NSGA-II 求解时,染色体的每一位基因编码为各节点每回重要负荷馈线的投运状态,1 表示投运,0 表示断开。每个染色体表示一种负荷恢复方案,根据恢复方案计算目标函数值,得到模型的 Pareto 最优解集。为避免求解模型时出现目标的偏好性,采用模糊熵权法^[22]对 Pareto 最优解集进行综合评价和排序,从而得到每一时步最优黑启动方案。

此外,在求解过程中,本文采用以下适用于风电参与黑启动的一般规则:大停电后,系统恢复至一定容量之后才能接入风电;风电接入之后,在风速正常时不能主动脱网;优先恢复火电机组辅机负荷;考虑多风电场启动时,为使风电接入更加合理,使其在电网分布更加均衡,避免一个风电场接入风机过多导致该风电场周边线路潮流重载,当有新的风电场并网时,优先增加该风电场的并网容量。

3 算例和仿真分析

本文以含风电的 IEEE 39 节点系统为算例验证所提模型和方法^[19],具体系统结构见图 2。为方便对系统结构进行描述,统一表示为: G_{30} 表示节点 30 机组, D_2 表示节点 2 负荷, L_{1-2} 表示节点 1 与节点 2 间线路, W_4 表示节点 4 的风电场,其他类似。图中 G_{33} 为水电机组,作为黑启动电源, W_4 和 W_{18} 均由 80 台单机

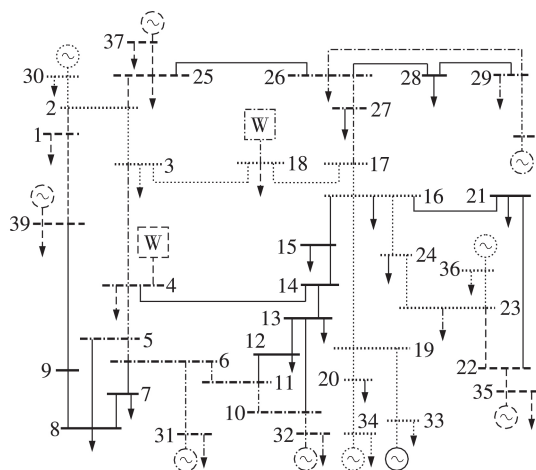


图2 含风电场的 IEEE 39 节点系统

Fig.2 IEEE 39-bus system with wind farms

容量为 1.5 MW 的双馈风电机组组成,本文认为同一风电场的每台风机运行状况相同。在黑启动初期,假定火电机组能在启动辅机后 30 min 内并网发电。设各节点每回馈线负荷量为该点重要负荷量的 1/10。NSGA-II 的交叉概率为 0.9,变异率为 0.1,种群大小为 50。

3.1 算例分析

考虑到风电参与黑启动处于评估状态,本文首先为不计及风电参与的情况制定 TBSS,然后在 TBSS 的基础上,对风电参与进行评估和接入,最后对 BSSW 进行优化。

本文直接采用文献[24]所制定出的 TBSS,其考虑网架重构过程中系统失电风险最小所得方案,满足系统安全约束。

结合本文考虑的风电接入时机评估和 TBSS,恢复到第 2 时步时新增 G_{36} 并网发电,双机并列运行,系统达到接纳风电最小容量规模。当 TBSS 的第 2 时步恢复完成时,系统供电至风电场 W_{18} ,此时可考虑 W_{18} 的恢复,但还需要对风速进行评估。假定第 3 时步时 W_{18} 的预测风速如附录中图 A1 所示,风电场总输出功率大于额定容量的 10%,可知该时步风速满足并网要求。因此,风电场 W_{18} 在第 3 时步接入系统,根据风电接入量求解模型,得到该时步 W_{18} 接入风电容量为 108 MW。 W_{18} 接入新增的启动功率优先恢复 C_{32} 、 C_{38} 的辅机负荷 D_{32} 、 D_{38} 。为保证 W_{18} 部分风机接入后系统安全稳定运行,根据风电参与黑启动系统负荷恢复优化模型对第 3 时步的负荷恢复进行优化求解,得到该时步负荷恢复 Pareto 最优解集如表 1 所示(表中节点电压偏差为标幺值,后同)。然后采用模糊熵权法对该时步方案集进行综合评价,获得权重向量为 $W=[0.298, 0.248, 0.454]$ 。通过计算各方案的综合评价值,确定该时步最优负荷恢复方案为方案 4。此时,系统的恢复范围由图 2 中虚线区域向点划线区域扩展。

表1 第3时步负荷恢复 Pareto 最优解集

Table 1 Optimal Pareto solution set of load recovery at third time step

方案	目标节点 (投入负荷/MW)	可恢复负荷 量/MW	节点负荷 重要度	节点电 压偏差	综合 评价值
1	18(15.8), 23(24.6), 29(21.1)	61.5	2.2310	0.703	0.189
2	18(15.8), 23(12.3), 26(13.9), 29(21.1)	63.1	2.1970	0.638	0.197
3	23(24.6), 26(27.8)	52.4	2.2104	0.626	0.188
4	23(12.3), 26(27.8), 29(21.1)	61.2	2.1490	0.487	0.220
5	23(24.6), 26(13.9), 29(21.1)	59.6	2.1830	0.554	0.206

当 TBSS 的第 3 时步恢复完成时,系统供电至风电场 W_4 ,新增 G_{34} 并网发电。假定第 4 时步 W_4 的预

测风速如附录中图 A2 所示,风电场总输出功率大于该额定容量的 10%,可知该时步风速满足并网要求。此时, W_4 在第 4 时步接入系统,根据风电接入量求解模型,得到该时步 W_4 接入风电容量为 36 MW。 W_4 接入新增的启动功率优先恢复 G_{39} 、 G_{37} 、 G_{35} 的辅机负荷 D_{39} 、 D_{37} 、 D_{35} ,为保证 W_{18} 、 W_4 部分风机接入后系统安全稳定运行,根据风电参与黑启动系统负荷恢复优化模型对第 4 时步的负荷恢复进行优化求解,得到该时步负荷恢复 Pareto 最优解集如表 2 所示。

表 2 第 4 时步负荷恢复 Pareto 最优解集

Table 2 Optimal Pareto solution set of load recovery at fourth time step

方案	目标节点 (投入负荷/MW)	可恢复负荷 量/MW	节点负荷 重要度	节点电 压偏差	综合 评价
1	1(90.0), 18(31.6), 29(28.2)	149.8	3.774	0.993	0.203
2	1(60.0), 16(57.8), 25(22.4), 29(14.1)	154.3	3.178	1.297	0.185
3	23(60.0), 16(28.9), 18(31.6), 29(28.2)	148.7	3.798	1.253	0.193
4	1(60.0), 18(47.4), 25(22.4), 29(14.1)	143.9	3.819	1.187	0.195
5	1(30.0), 4(35.0), 18(15.8), 25(44.8), 29(28.2)	153.8	3.678	0.994	0.214

然后采用模糊熵权法对该时步方案集进行综合评价,获得权重向量为 $W=[0.358, 0.199, 0.443]$ 。通过计算各方案的综合评价值,确定该时步最优负荷恢复方案为方案 5。此时,系统的恢复范围由图 2 中虚线区域向短划线区域扩展, BSSW 中所有火电辅机均已供电。

通过对黑启动过程中风电接入评估和负荷恢复优化,对 TBSS 进行修正得到 BSSW,如表 3 所示。

由表 3 中 BSSW 与 TBSS 对比可知,当风电不满足并网条件时, BSSW 与 TBSS 操作一致。在 BSSW 恢复至第 3 时步时, W_{18} 参与黑启动,使得 G_{32} 、 G_{38} 的辅机负荷提前恢复。在 BSSW 恢复至第 4 时步时, W_4 参与黑启动,加快了 G_{39} 、 G_{37} 、 G_{35} 的辅机负荷的恢复,此时, BSSW 已恢复了所有辅机负荷,而 TBSS 只恢复了部分辅机负荷,因此,采用 BSSW 使得机组并网时间大幅提前,有效加快了系统恢复进程。

为使风电能够安全、高效地参与黑启动,本文不仅对风电的接入进行全面评估,还对风电接入之后的负荷恢复方案进行优化。表 4 为风电参与黑启动分析,由表中可知,随着系统逐步恢复,系统调频能力、机组爬坡能力和已恢复负荷量逐渐增加,系统接纳风电的能力也有所提升,表明了本文所提出的风电接入量评估方法的准确性和合理性。

表 5 为 BSSW 和 TBSS 恢复情况对比。其中, $|\Delta U_i|_{\max}$ 为系统中最大节点电压偏差; j 为所对应的

表 3 BSSW 和 TBSS 操作对比

Table 3 Comparison between BSSW and TBSS operation

时步	TBSS		BSSW			
	目标节点 (投入负荷 / MW)	新增 并网 机组	目标节点 (投入负荷 / MW)	W_{18} 接入 量 /MW	W_4 接入 量 /MW	新增 并网 机组
0	33(30.0)	G_{33}	33(30.0)	0	0	G_{33}
1	36(16.5), 34(15.0)	—	36(16.5), 34(15.0)	0	0	—
2	30(17.5), 3(62.0)	G_{36}	30(17.5), 3(62.0)	0	0	G_{36}
3	31(30.0), 4(31.0)	G_{34}	31(30.0), 38(15.0), 32(12.5), 23(12.3), 26(27.8), 29(21.1)	108	0	G_{34}
4	38(15.0), 32(12.5), 29(155.0)	—	39(15.0), 37(16.0), 35(12.5), 1(30.0), 4(35.0), 18(15.8), 25(44.8), 29(28.2)	108	36	—

表 4 风电参与黑启动分析

Table 4 Analysis of wind power participating in black start

时步	已恢复负荷 量 /MW	接入风电量 / MW		调频能力 $0.5K_s$	爬坡能力 K_p	$R_{Bsw} / \%$
		W_{18}	W_4			
3	259.7	108	0	101.1	750	11.6
4	457.0	108	36	134.4	850	12.1

表 5 BSSW 和 TBSS 恢复情况对比

Table 5 Comparison between BSSW and TBSS recovery

时步	BSSW		TBSS	
	已恢复 负荷量/MW	$ \Delta U_i _{\max} (j)$	已恢复 负荷量/MW	$ \Delta U_i _{\max} (j)$
3	259.7	0.058(29)	202.0	0.1(23)
4	457.0	0.077(39)	384.5	0.1(11)

节点编号。由表 3、5 可知,在相同的时间内, BSSW 恢复的负荷比 TBSS 更多且更加重要,并且恢复负荷分布合理,在保证风电平稳接入的同时,使系统电压偏差更小,运行更加安全。

3.2 仿真分析

为了进一步验证 BSSW 的可行性和有效性,基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建模型对黑启动过程进行仿真,模拟系统第 3 时步由图 2 中虚线区域向点划线区域的恢复操作。根据上文制定的 BSSW,在第 3 时步风电场 W_{18} 并网,接入容量为 108 MW。为校验 BSSW 对风电波动的承受能力,从上文第 3 时步的预测风速数据中选取满足并网条件且波动较大的

风况进行仿真,如附录中图A1所示,其中 T_1 — T_2 阶段波动剧烈,该时段仿真结果如图3所示(图中节点电压为标么值)。图中, f 为系统频率; U_{18} 和 P_{W18} 分别为风电场 W_{18} 并网母线电压和输出功率; U_{29} 为节点29母线电压; P_{G33} 、 P_{G36} 分别为机组 G_{33} 、 G_{36} 出力。

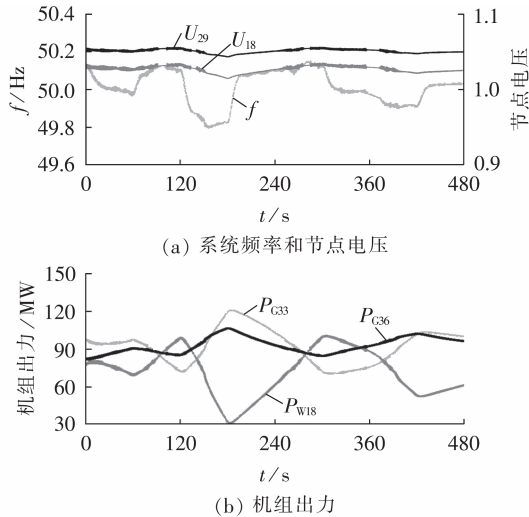


图3 BSSW仿真结果

Fig.3 Simulative results of BSSW

由图3可知,在波动较大的风况下,系统频率 f 和 W_{18} 并网母线电压 U_{18} 均未越限,这说明本文对风电接入量评估较为保守,其中频率的波动比电压波动更为剧烈,说明了黑启动阶段频率是限制风电接入的主要因素,验证了本文风电接入量评估方法的准确性。节点29母线电压 U_{29} 的值最大,且与BSSW中计算值接近,仿真结果与理论计算值一致,说明BSSW是可靠、合理的。

综上可知,本文所提BSSW是可行、有效的,采用机会约束能够解决风电不确定性问题,在黑启动过程中适时、适量接入风电,将有效加快系统恢复。

4 结论

为使风电能有效、安全地参与系统恢复,本文首先针对黑启动阶段,提出基于系统调频能力和机组爬坡能力的风电最佳接入量评估方法,通过建立机会规划模型进行求解,验证了其对确定系统黑启动阶段风电接纳能力有较好的通用性;然后确定风电参与黑启动的接入时机指导规则,提出考虑风电参与的黑启动方案的优化方法,将风电与待恢复机组、负荷分时步进行协调优化,制定出风电参与的系统最优黑启动方案;最后,以含风电的IEEE 39节点系统为算例进行分析,研究结果表明,在保证系统安全平稳恢复的基础上,本文方法能充分利用风电,增加了黑启动阶段的启动功率且加快了系统恢复进程。

此外,本文所提风电接入量评估方法适用于黑启动阶段,待系统逐步恢复且网架更加坚强之后,对于风电接入的标准可以放宽,这有待于进一步研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] ANCONA J J. A framework for power system restoration following a major power failure[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3): 1480-1485.
- [2] LIU Y T, FAN R, TERZIJA V. Power system restoration: a literature review from 2006 to 2016[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(3): 332-341.
- [3] 刘巨,姚伟,文劲宇,等. 大规模风电参与系统频率调整的技术展望[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 638-646.
LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu, et al. Prospect of technology for large-scale wind farm participating into power grid frequency regulation[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 638-646.
- [4] 李少林,秦世耀,王瑞明,等. 大容量双馈风电机组虚拟惯量调频技术[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 145-150, 156.
LI Shaolin, QIN Shiyao, WANG Ruiming, et al. Control strategy of virtual inertia frequency regulation for large capacity DFIG-based wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 145-150, 156.
- [5] 付媛,王毅,张祥宇,等. 变速风电机组的惯性与一次调频特性分析及综合控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4706-4716.
FU Yuan, WANG Yi, ZHANG Xiangyu, et al. Analysis and integrated control of inertia and primary frequency regulation for variable speed wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4706-4716.
- [6] 王刚,付乔明,崔志勇,等. 一种风力机虚拟惯量控制与传统发电机调速控制的协调方法[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2794-2801.
WANG Gang, SHI Qiaoming, CUI Zhiyong, et al. A coordinated strategy of virtual inertia control of wind turbine and governor control of conventional generator[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2794-2801.
- [7] ZERTEK A, VERBIC G, PANTOS M. A novel strategy for variable-speed wind turbines' participation in primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 791-799.
- [8] 吴子双,于继来,彭喜云. 高风速段次优功率追踪方式的风电调频方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 112-119.
WU Zishuang, YU Jilai, PENG Xiyun. DFIG's frequency regulation method only for high wind speed with suboptimal power tracking[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 112-119.
- [9] 赵晶晶,吕雪,符杨,等. 基于双馈感应风力发电机虚拟惯量和桨距角联合控制的风光柴微电网动态频率控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3815-3822.
ZHAO Jingjing, LÜ Xue, FU Yang, et al. Dynamic frequency control strategy of wind/photovoltaic/diesel microgrid based on DFIG virtual inertia control and pitch angle control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3815-3822.
- [10] 汤奕,戴剑丰,冯祎鑫,等. 基于虚拟惯量的风电场黑启动频率协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 19-24, 32.
TANG Yi, DAI Jianfeng, FENG Yixin, et al. Cooperative frequency control strategy for wind farm black-start based on virtual inertia[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 19-24, 32.
- [11] 刘力卿,杜平,万玉良,等. 储能型风电场作为局域网黑启动电源的可行性探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 210-216.

- LIU Liqing, DU Ping, WAN Yuliang, et al. Feasibility discussion on using storage-based wind farm as black-start power source in local power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 210-216.
- [12] SUN F, ZHAO Y, WANG G, et al. Study on charging and discharging characteristics of energy storage system in wind storage power plant under the condition of black start[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1070/1071/1072: 443-448.
- [13] ZHU H, LIU Y. Aspects of power system restoration considering wind farms[C]//International Conference on Sustainable Power Generation and Supply(SUPERGEN 2012). Hangzhou, China: Institution of Engineering and Technology, 2012: 1-5.
- [14] 杜康, 刘艳, 叶茂, 等. 辅助风电场参与初期黑启动时储能电站容量配置策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 62-68.
- DU Kang, LIU Yan, YE Mao, et al. Capacity configuration strategy of energy storage power station when assisting the wind farm in integrating into the preliminary black start[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 62-68.
- [15] DANG J, HARLEY R G. Islanded microgrids black start procedures with wind power integration[C]//2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2013. New York, USA: IEEE, 2013: 1-5.
- [16] EL-ZONKOLY A M. Renewable energy sources for complete optimal power system black-start restoration[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(6): 531-539.
- [17] ZAININGER H W, BELL D J. Potential dynamic impacts of wind turbines on utility systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(12): 4821-4829.
- [18] 汤雪松, 殷明慧, 邹云. 考虑风速相关性的风电穿透功率极限的改进计算[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 420-425.
- TANG Xuesong, YIN Minghui, ZOU Yun. An improved method to calculate wind power penetration limit considering wind speed correlation[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 420-425.
- [19] 叶茂, 刘艳, 顾雪平, 等. 基于动态风电穿透功率极限的黑启动方案制定[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 744-752.
- YE Mao, LIU Yan, GU Xueping, et al. Black start scheme formation considering dynamic wind power penetration limit[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 744-752.
- [20] 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 CSEE, 2002, 22(5): 32-35.
- [21] ADIBI M M, BORKOSKI J N, KAFKA R J, et al. Frequency response of prime movers during restoration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(2): 751-756.
- [22] 国家能源局. 风电场功率预测预报管理暂行办法: 国能新能[2011]177号[S]. 北京: 国家能源局, 2011.
- [23] 顾雪平, 赵宝斌, 刘文轩. 结合多目标优化与灰色关联决策的负荷恢复方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 6-13.
- GU Xueping, ZHAO Baobin, LIU Wenxuan. Load restoration based on multi-objective optimization and grey incidence decision-making[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 6-13.
- [24] 刘艳, 张华. 基于失电风险最小的机组恢复顺序优化方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 46-53.
- LIU Yan, ZHANG Hua. Optimization of units' restoration sequence based on minimizing risk of electrical energy loss[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 46-53.
- [25] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

作者简介:



顾雪平

顾雪平(1964—),男,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统安全稳定评估与控制、电力系统安全防御和系统恢复、智能技术在电力系统中的应用(E-mail: xpgu@ncepu.edu.cn);

李新军(1993—),男,江西吉安人,硕士研究生,研究方向为新能源参与黑启动、电力系统恢复与控制(E-mail: lixinjun-11ban@163.com)。

(编辑 王锦秀)

Black start scheme considering wind power participation

GU Xueping, LI Xinjun, YANG Chao, LI Shaoyan

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Wind power has the characteristics of small start-up power and fast start-up speed, and the safe and stable use of wind power will effectively accelerate the restoration process of power system. Considering system frequency regulation ability and unit climbing ability constraints, an estimation method of optimal wind power integration capacity in black start is proposed based on the opportunity constrained programming model, and the integration time of wind power is assessed. In order to effectively make use of wind power, an optimization method of black start scheme considering wind power participation is proposed, the wind power integration and load restoration are coordinately optimized by time step, and the optimal black start scheme with wind power participation is formulated. IEEE 39-bus system with wind power is taken as an example to verify the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: black start; wind power integration assessment; system frequency regulation ability; load restoration; multi-objective optimization

附录：

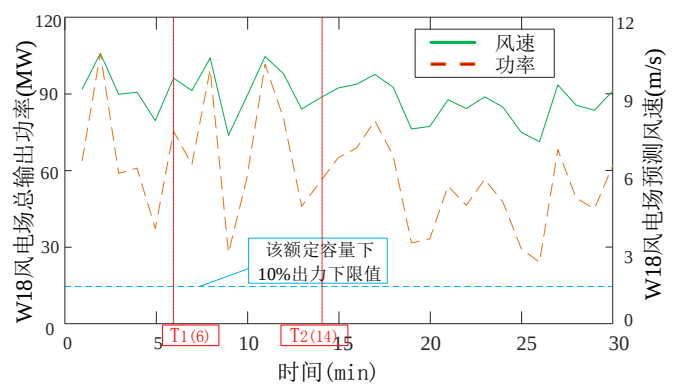


图 A1 第 3 时步风电场 W₁₈ 预测风速数据与总输出功率

Fig. A1 Forecasted wind speed data and total output power of Wind Farm W₁₈ in third time step

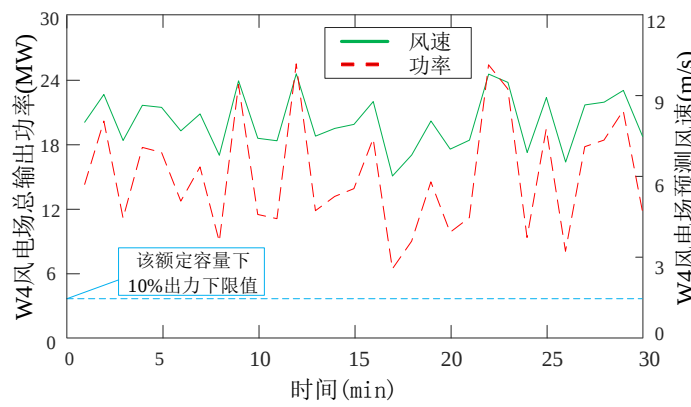


图 A2 第 4 时步 W₄ 风电场预测风速数据与总输出功率

Fig. A2 Forecasted wind speed data and total output power of Wind Farm W₄ in fourth time step