## 大停电背景下考虑系统暂态安全的动态风电穿透功率极限计算

叶 茂<sup>1</sup>,刘 艳<sup>1</sup>,顾雪平<sup>1</sup>,韩思聪<sup>1</sup>,王少博<sup>2</sup> (1. 华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003; 2. 国网冀北电力有限公司张家口供电公司,河北 张家口 075000)

摘要:动态风电穿透功率极限(DWPPL)代表黑启动过程中系统在不同恢复时段对风电的接纳能力,其成功 求解可以指导风电在系统恢复过程中的有序接入,进而使系统依靠风电启动功率小、启动速度快的优势,加 快系统恢复进程。为了更加准确地求解 DWPPL,建立计及系统暂态安全约束的 DWPPL 非线性整数规划模型,该模型采用二元表的方式统一描述了各暂态安全约束;提出基于纵横交叉优化算法和 PSD-BPA 仿真的 DWPPL 求解方法。针对含风电的 IEEE 39 节点系统中某具体黑启动方案,求解了各时段的 DWPPL 并验证 了算法的优越性;在 PSD-BPA 上仿真验证了所求 DWPPL 的正确性和考虑系统暂态安全的必要性。

关键词:动态风电穿透功率极限;系统恢复;暂态安全;PSD-BPA;纵横交叉优化算法

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.11.025

## 0 引言

中图分类号:TM 761

随着全球气候变化形势的渐趋严峻和化石能源 的逐步枯竭,世界各国都认识到了发展可再生能源 的重要性,并对风电发展高度重视。自 1996 年以 来,全球风电装机年均增长率保持在 25%以上,风能 成为世界上增长最快的清洁能源。我国风电发展 "十三五"规划提出"到 2020 年底,风电累计并网装 机容量确保达到 2.1 亿千瓦以上,风电年发电量确 保达到 4 200 亿千瓦时,约占全国总发电量 6%"的 目标。

不断提高的风电渗透率给电力系统的安全稳定运行带来了严峻挑战。与传统水、火电机组不同,变速风力发电机组转速与电力系统频率解耦,不具备惯性响应及辅助调频能力,大规模风电替代部分传统电源将减小电力系统的惯性,并削弱其频率调节能力<sup>[1]</sup>;而且风电具有间断性、波动性的特点,恶劣的风电爬坡事件可能导致系统因功率缺额而失稳,诱发连锁故障,进而引起大停电事故<sup>[2]</sup>。

为了避免因接入过多风电而危及系统的运行安 全和稳定,学者们提出了许多求解风电穿透功率极 限(WPPL)的方法,用以确定风电的最大安全接入 量。其中,直流潮流算法能快速地求解出较为准确 的 WPPL<sup>[3]</sup>;Monte Carlo 模拟法能够求解不同置信 水平下的 WPPL<sup>[4]</sup>;值得注意的是,文献[5]将电力 系统柔性概念引入 WPPL 的研究中,提出了基于电 力系统柔性评价的 WPPL 计算方法。

收稿日期:2018-01-05;修回日期:2018-08-06

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(2016XS95)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677071) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2016XS95) 前人的研究已经较为全面地评估了系统在正常 运行时对风电的承受能力,得到了许多高效的 WPPL求解方法。然而,目前还极少有人研究系统 在黑启动过程中对风电的承受能力,而这显然是有 意义的。因为高风电渗透率的电力系统大停电后, 可用的启动功率较为匮乏,若能依靠风电启动功率 小、启动速度快的优势,积极有序地接入风电,则可 以加快系统恢复进程<sup>[6]</sup>。

在黑启动过程中电网网架不断恢复和扩张,系 统接纳风电的能力也不断增长。为此,文献[7]提 出了动态风电穿透功率极限 DWPPL(Dynamic Wind Power Penetration Limit)这一新概念,用以表征黑启 动过程中系统在不同恢复时段对风电的接纳能力, 并在 DWPPL 的基础上,制定了考虑风电参与的黑 启动方案,但该文献对风电最大接入容量的求解仅 考虑了系统静态安全约束,所求结果相对乐观。本 文建立了计及暂态安全约束的 DWPPL 非线性整数 规划模型,采用二元表的方式统一描述了各暂态安 全约束:建立了求解 DWPPL 的双层循环结构,外层 用纵横交叉优化(CSO)算法来引导种群进化,内层 通过 PSD-BPA 仿真来校验每个个体的可行性;最后 通过具体算例求解了黑启动不同时步的 DWPPL,证 明了求解 DWPPL 时考虑暂态安全约束的必要性, 在 PSD-BPA 上的仿真结果验证了本文方法的有效 性和价值。

## 1 DWPPL 的建模

## 1.1 前提假设

为了使 DWPPL 的求解有据可依,本文首先提出以下合理假设。

a. 若风电并网后能连续稳定运行一定时长,则 可认定此风电对系统恢复有价值。多数情况下一台 非黑启动机组需要花费 1~3 h 时间启动(非冷态启 动),因此如果系统接入某容量的风电后能稳定运行 3h,就可认定此风电有助于非黑启动机组的启动, 对系统恢复是有价值的。

b. 仅当系统恢复至某风电场附近节点时,才考虑让此风电场并网。由于现有的风电场多数是不具备自启动能力的,要实现风电的自启动需要调整控制策略<sup>[8]</sup>、改造装置<sup>[9]</sup>,因此本文暂不考虑风电自启动,认为风电要依靠附近电网的支撑才能安全并网和参与黑启动。

#### 1.2 DWPPL 的求解模型

基于以上假设,求解 DWPPL 实际上就是通过 确定各风电场的接入容量,在保证系统能够安全稳 定运行的前提下,使风电未来 3 h 的平均出力最大。 因此,这是一个非线性整数规划问题,其目标函数为:

$$\max P_{w\Sigma} = \sum_{i=1}^{n_w} \overline{P}_{wi} = \sum_{i=1}^{n_w} \left[ \sum_{j=1}^{180} g(N_i, v_{wij}) / 180 \right] \quad (1)$$

其中, P<sub>wx</sub>为各风电场在未来3h风况下的平均预测 出力之和; n<sub>w</sub>为并网风电场的数量; P<sub>wi</sub>为第i个风 电场在未来3h风况下的平均预测出力; g为风电场 有功出力函数, 在所有风力发电机组单机容量相同 的情况下可近似表示为式(2)<sup>10</sup>; N<sub>i</sub>为第i个风电 场并网风力发电机的台数; v<sub>wij</sub>为第i个风电场未来 第j分钟的预测风速。

$$P_{w} = g(N, v_{w}) = \begin{cases} 0 & v_{w} \leq v_{ci}, v_{w} \geq v_{co} \\ \frac{NP_{n}}{v_{n}^{3} - v_{ci}^{3}} (v_{w}^{3} - v_{ci}^{3}) & v_{ci} \leq v_{w} \leq v_{n} \\ NP_{n} & v_{n} \leq v_{w} < v_{co} \end{cases}$$
(2)

其中, $P_w$ 为风电出力;N为风电场并网的风力发电 机台数, $N \in (0, N_{inst})$ , $N_{inst}$ 为该风电场的装机台数;  $v_w$ 为风力发电机轮毂高度处的风速; $v_{ci}$ 和 $v_{co}$ 分别为 切入、切出风速; $v_n$ 为额定风速; $P_n$ 为风力发电机的 单机额定容量, $NP_n$ 即该风电场并网风电机组的总 额定容量,也即该风电场的接入容量。

因风速不可控,故式(1)以风电接入台数向量  $N_w = (N_1, N_2, \dots, N_{n_w})$ 为变量,解出的最大 $P_{w\Sigma}$ 即代 表此刻系统的 DWPPL。

系统稳态运行时需要满足约束:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n_{w}} P_{wi} + \sum_{j=1}^{n_{g}} P_{gj} = \sum_{k=1}^{n_{d}} P_{dk} + \sum_{m=1}^{n_{1}} P_{lm} \\ f_{smin} \leqslant f_{s} \leqslant f_{smax} \\ V_{smin} \leqslant V_{s} \leqslant V_{smax} \\ P_{L} \leqslant P_{Lmax} \\ P_{gmin} \leqslant P_{g} \leqslant P_{gmax} \\ Q_{gmin} \leqslant Q_{g} \leqslant Q_{gmax} \\ D_{s} > D_{smin} \end{cases}$$
(3)

其中, $P_{g}$ 和 $Q_{g}$ 分别为发电厂有功出力和无功出力;  $P_{d}$ 为负荷功率; $P_{1}$ 为支路损耗功率; $n_{g}$ 为除风电机 组以外的发电机组总数; $n_{d}$ 为负荷的数量; $n_{1}$ 为包 括线路和变压器在内的支路总数; $f_{s}$ 和 $V_{s}$ 分别为系 统稳态的频率和节点电压; $P_{L}$ 为支路传输功率; $D_{s}$ 为小扰动后系统动态过程的阻尼比,根据文献 [11],取 $D_{smin}$ =0.01;下标 max 和 min 分别表示系统 规定的各对应量的上、下限。式(3)中依次为潮流 平衡约束、系统的稳态频率约束、稳态电压约束、线 路传输功率约束、发电机有功出力约束、发电机无功 出力约束和小干扰稳定约束。

风电过量接入除了会恶化系统的稳态运行安全 性,还会使系统的暂态安全性下降,因此,为避免风 电接入过多导致系统暂态安全性较差,需要在此模 型中添加暂态安全约束。电力系统暂态安全性包括 图1所示5个方面<sup>[12]</sup>。其中,系统是否暂态电压 (频率)稳定,在工程上可根据暂态电压(频率)处于 某过高值以上或某过低值以下的时间是否超过其限 定时长来判定。具体而言,根据文献[11]的工程判 据,系统暂态稳定约束可表示为:暂态电压低于0.75 p.u.的时长不得超过1s,暂态频率低于47.5 Hz 的 时长不得超过5 s。为方便描述,将其简记为(阈值, 时限)二元表,即(0.75 p.u.,1 s)和(47.5 Hz,5 s)。



#### 图1 电力系统暂态安全性

Fig.1 Transient security of power system

由于风电机组相较于水、火电机组而言,其承受 电压和频率偏移的能力更弱,故含风电系统的暂态 电压和频率偏移可接受性主要受限于风电机组。 根据文献[13]对分布式电源电压和频率响应时间 的要求及文献[14]对风电场高、低电压穿越的要 求,可将暂态电压和频率偏移可接受性约束表示为 一组(阈值,时限)二元表,汇总以上二元表得到如 表1所示含风电系统的暂态电压和频率安全性约 束,表中 V<sub>d</sub>(标幺值)和 f<sub>d</sub>分别为节点电压阈值和 系统频率阈值,t<sub>x</sub>和 t<sub>f</sub>分别为阈值对应的时长限制。

表1中含风电系统的暂态电压安全性约束和暂态频率安全性约束各由5个二元表组成,其中加粗的2个二元表即系统的暂态电压稳定约束和暂态频率稳定约束,而其余8个二元表皆为暂态电压(频率)偏移可接受性约束,其含义如式(4)所示。

综上分析可知,含风电系统的暂态安全性约束 可以表示为:

#### 表1 含风电系统的暂态电压和暂态频率安全性约束

Table 1 Transient voltage and frequency security constraints of power system integrated with wind power

	° .
$(V_{\rm d}, t_{\rm v}/{\rm s})$	$(f_{\rm d}/{\rm Hz}, t_{\rm f}/{\rm s})$
(1.2,0)	(50.5,0)
(1.1,2)	(50.2,300)
(0.85,2)	(49.5,600)
(0.75,1)	(48,60)
(0.2,0.625)	(47.5,5)

$$\begin{cases} \nabla \theta < \nabla \theta_{\max} \\ t(V_{d}^{i}) < t_{v}^{i} \quad i=1,2,\cdots,5 \\ t(f_{d}^{j}) < t_{f}^{j} \quad j=1,2,\cdots,5 \end{cases}$$
(4)

其中, $\nabla\theta$ 为发电机功角差,根据文献[11],取 $\nabla\theta_{max}$ = 180°; $V_{a}^{i}$ 表示表1中 $V_{a}$ 的第i个元素,若 $V_{a}^{i}$ <1 p.u., 则 $t(V_{d}^{i})$ 表示暂态电压低于 $V_{a}^{i}$ 的时长,反之则表示 暂态电压高于 $V_{a}^{i}$ 的时长; $f_{a}^{i}$ 表示表1中 $f_{a}$ 的第j个 元素,若 $f_{a}^{i}$ <50 Hz,则 $t(f_{d}^{i})$ 表示暂态频率低于 $f_{d}^{i}$ 的 时长,反之则表示暂态频率高于 $f_{a}^{i}$ 的时长。式(4) 中依次为暂态功角稳定约束、暂态电压安全约束和 暂态频率安全约束。

式(1)—(4)即构成了求解 DWPPL 的非线性整数规划模型,该模型采用(阈值,时限)二元表的方式统一描述了系统的暂态稳定性约束和暂态偏移可接受性约束,其约束限值均出自国家的相关标准和规定文件,后期可以随着相关文件的更新而更新。

## 2 DWPPL 的求解

以上 DWPPL 求解模型中, 暂态约束与优化变 量间的函数关系较复杂,特别是暂态安全约束中(阈 值,时限) 二元表难以线性化, 因此无法通过数学规 划的方法直接求解, 而需要采用合适的智能算法来 引导求解。在既定风电装机容量的限制下, 利用智 能算法在风电接入台数向量空间中全局搜索最优 *N*<sub>w</sub>, 在搜索的过程中, 不断通过时域仿真来校验每 个*N*<sub>w</sub> 的可行性。以下先介绍运行安全约束的校验 方法, 再引出智能算法求解 DWPPL 的具体流程。

## 2.1 基于 PSD-BPA 仿真的运行安全约束校验

式(4)所示约束只能通过仿真求解的方法进行 校验,考虑到中国电科院的 PSD-BPA 仿真软件<sup>[15]</sup> 应用较为广泛、结果的可信度较高,本文用它来仿真 校验式(4)约束,对 PSD-BPA 进行二次开发,调用其 潮流计算和小干扰稳定计算内核来校验式(3)所示 稳态运行约束,调用其暂态稳定计算内核来校验式 (4)所示暂态安全约束。

判断某风电接入台数向量 N<sub>w</sub> 是否可行,只需 看各风电场按 N<sub>w</sub> 接入系统后,在预测风况的最恶 劣场景下系统是否会违反式(3)和式(4)所示约束。 因此,需要根据风电场上报的未来 3 h 预测出力数 据,用其中最恶劣的风电出力场景来仿真校验稳态 运行约束,用其中最恶劣的故障场景来仿真校验暂 态安全约束。以下对这2点分别详细说明。

a.风电出力波动时,稳态运行约束越限一般发 生在风电出力最大或最小时。根据风电场上报的未 来 3 h 预测出力,可以得到风电出力最大和最小时 的场景,对这 2 个场景进行潮流计算和小干扰稳定 计算,就可以完成稳态运行约束的校验。

b. 由于电力系统一次调频和二次调频的响应 时间都在分钟级以内,因此对系统威胁大的风电出 力序列一般是分钟级出力波动较大的[16],故对风速 的随机性简化处理时,可以从风电场上报的未来3h 风速数据(时间分辨率为1 min)中挑出波动最恶劣 的 2 min 风速数据, 假定这 2 min 风速分别为  $v_{min}$  和  $v_{\text{max}}$ ,则建立 GV 卡风速模型<sup>[15]</sup>模拟风速在 2 min 内 从 v<sub>min</sub>上升至 v<sub>max</sub>再降回 v<sub>min</sub>的过程,以此作为最恶 劣的风速波动场景:考虑到系统恢复过程中发生线 路单相瞬时故障相对于其他瞬时性故障的概率更 大,而风电相较于水、火电机组承受电压、频率偏移 的能力更差,因此本文在校验系统的暂态安全性约 束时,将故障统一设置为最大出力风电场主送电通 道上的单相瞬时性故障,故障时刻取为风速达到 $v_{max}$ 时,此时故障引起的短时功率缺额最大,最易引起暂 态安全约束的越限。

用最恶劣场景来校验各约束,只需要执行2次 潮流计算、2次小干扰稳定计算和1次暂态稳定计 算就可以确定每个风电接入台数向量N<sub>w</sub>是否安全。 此外,若要计及风速的预测误差,可以用风速的历史 预测误差服从的分布,通过随机模拟来修正以上最 恶劣场景,然后再使用本文方法进行仿真校验。

以上通过"简化场景分析"的方法实现了基于 PSD-BPA 仿真的运行安全约束快速校验。为了进 一步提高仿真校验的速度,本文采取以下 2 个措施: 并行仿真,对每个 N<sub>w</sub> 开启 5 个线程并行校验,只要 有 1 个线程校验不通过,就立即结束其他线程的校 验,并判定为校验不通过;以空间换取时间,每次校 验结束后,无论校验是否通过都记录校验结果,每次 对某 N<sub>w</sub>执行校验之前,都查询判断是否可以预知其 校验结果,只校验真正需要校验的。最终得到加快 校验某风电接入台数向量的方法,如图 2 所示。

#### 2.2 采用 CSO 算法求解 DWPPL

前已述及,本文的 DWPPL 模型宜用智能算法 求解,考虑到 CSO 算法<sup>[17]</sup> 能改善遗传算法"早熟" 的缺陷,在全局收敛能力和收敛速度方面具有一定 优势<sup>[18]</sup>,且本文 DWPPL 模型的优化变量  $N_w$  各维 是同一量纲,符合 CSO 算法纵向交叉的要求,因此 本文采用 CSO 算法求解 DWPPL。以风电接入台数 向量  $N_w = (N_1, N_2, \dots, N_a)$  为种群个体,以式(1)所



Fig.2 Method of accelerating check of  $N_{\rm w}$ 

示目标函数为适应度函数,得到采用 CSO 算法求解 DWPPL 的流程如图 3 所示。



#### 图 3 CSO 算法求解 DWPPL 的流程

Fig.3 Flowchart of solving DWPPL with CSO algorithm

由图 3 可知,采用 CSO 算法求解 DWPPL 是双 层循环结构,外层用 CSO 算法来引导种群进化,内 层通过时域仿真来校验每个个体的的可行性。其 中,每次在执行交叉算子产生新个体时,需要先将个 体就近整数化,再执行"强制生优操作"以保持种群 的规模和个体可行性。"强制生优操作"出的是在 交叉产生新个体时就立即校验新个体的可行性,若 不满足约束则将其剔除,并继续原交叉操作直到产 生新的可行个体代替它。以目标函数为适应度函 数,通过竞争算子优胜劣汰,当连续 2 代的平均适应 度和最优适应度都不变时,则表示迭代已收敛,输出 其中的最优个体即最佳 N<sub>w</sub>,进而求得 DWPPL。

## 3 算例和仿真

在含风电的 IEEE 39 节点系统中验证所建模型

与方法,系统接线如图 4 所示,系统电源参数详见文献[19],风电场 W4 和 W18 均由 80 台单机容量为 1.5 MW 的 GE 1500xle 型 DFIG 风力发电机组成。假定 G36(母线 36 处发电机,其他类似)能在启动辅机 负荷后 5 min 内并网发电,则按文献[19]制定的黑启动方案,第 4 时步(*T*时刻)系统已经恢复了图 4 中加粗的区域。此时 G33 和 G36 已形成了双机并 列运行的稳定小系统,并远距离恢复了 G30 的厂用 电,此场景较好地符合了"风电一般位于电网末端"的特点。以下先演示运行安全约束的仿真校验,再采用 CSO 算法求解系统各时步的 DWPPL。



图 4 T 时刻含风电的 IEEE 39 节点系统 Fig.4 IEEE 39-bus system with wind power at time T

#### 3.1 运行安全约束的仿真校验

本文以风电场 W4 和 W18 分别接入 21 台和 41 台风电机组,即  $N_w$  = [21,41]的校验为例,演示仿真 校验的细节。

a. 稳态运行约束校验。

由于 DFIG 型风电场具备一定的无功调节能力, 而黑启动时电力系统较为薄弱,无功功率对电压的 影响非常大,因此风电场在黑启动初期时一般采用 恒压模式运行,故潮流计算时将 W4 和 W18 风电节 点都设置为 PV 节点,对应 PSD-BPA 中的 BQ 卡。

假定 W4 和 W18 风电场在 T 时刻所上报的未 来 3 h 风况数据如附录所示,则未来 3 h 最大风电出 力场景为 P<sub>wmax</sub> = [29.7,19.5] MW,最小风电出力场 景为 P<sub>wmin</sub> = [22.05,3.75] MW,向量中 2 个元素分别 代表 W4 和 W18 的出力。

以  $P_{wmax}$  和  $P_{wmin}$  设置风电节点 BQ 卡的数据,分 别在这 2 个场景下执行潮流计算和小干扰稳定计 算,得到表 2 所示结果。表 2 中  $V_s^{max}$ 、 $V_s^{min}$ 、 $D_s^{min}$ (均为 标幺值)分别为相应变量的实际最大值和实际最小值; P<sub>g33</sub>和 Q<sub>g33</sub>分别为 G33 的有功出力和无功出力; P<sub>g36</sub>和 Q<sub>g36</sub>分别为 G36 的有功出力和无功出力。

表 2 稳态运行约束的校验结果

校验量	约束	最大风电 出力场景 时的值	最小风电 出力场景 时的值	校验 结果
$V_{\rm s}^{\rm max}$	≤1.10	1.053	1.052	通过
$V_{s}^{min}$	≥0.90	0.960	0.960	通过
$P_{\rm g33}/\rm MW$	[30.0,197.3]	106.6	130.1	通过
$Q_{\rm g33}/{ m Mvar}$	[-180.0,360.0]	-84.2	-82.7	通过
$P_{\rm g36}/\rm MW$	[16.5,60.7]	16.5	16.5	通过
$Q_{ m g36}/ m Mvar$	[-99.0,198.0]	-21.0	-21.0	通过
$D_{ m s}^{ m min}$	≥0.01	0.095	0.096	通过

由表2可知,*N*<sub>w</sub>=[21,41]满足式(3)所示约束。 **b.** 暂态安全约束校验。

从风电场未来 3 h 的风况数据中挑选出最恶劣 的 2 min 风速波动场景,在此场景下 W4 的风速在 10.27~11.28 m/s 之间波动,而 W18 的风速在 6.73~7.94 m/s 之间波动,以此设置 2 个风电场的风速模 型 GV 卡的数据。

在此最恶劣风速波动场景下,风电场 W4 的出 力明显比 W18 大,故将单相瞬时性故障设置在 W4 的主送电通道(即线路 3-4)上,故障时刻为 W4 的 风速达到 11.28 m/s 时,以此设置故障模型 FLT 卡 数据。更为详细的暂态稳定计算参数设置见附录。

在以上参数设置下执行暂态稳定计算,最终求 得此场景下最大发电机功角差为32°,暂态频率和电 压曲线如图5所示(图中节点4电压为标幺值)。



Fig.5 Simulative results of single-phase transient fault

由图 5 可知,在此最恶劣故障场景下,系统频 率和电压满足式(4)的暂态安全约束,未出现风电 场整体切机的现象;但系统频率偏差最大时已经接 近 0.5 Hz,将引起风力发电机的高频保护动作。进 一步分析可知,若去除此高频偏移约束,则 $N_{w}$ = [21,41]时易于越限的约束将变为低电压偏移约 束,由此表明,若要使风电更多地参与系统恢复, 一方面需增强系统的调频稳压能力,另一方面也需 提高风电机组的高频承受能力和低电压穿越能力。

综上分析可知,风电接入台数向量  $N_w$  = [21, 41]通过校验,即系统在 T 时刻接入 W4 风电场的 21 台风电机组和 W18 风电场的 41 台风电机组是安全 的。此次校验所进行仿真的计算用时如表 3 所示, 其中一次仿真计算的用时包括 PSD-BPA 的求解用 时和计算结果的解析用时。

表 3 仿真计算用时

 Table 3 Simulative and computational time

 计算类型
 平均用时/(s·次<sup>-1</sup>)

 潮流计算
 0.371 8

0.430 9

0.910 2

# 3.2 采用 CSO 算法求解 DWPPL

小干扰稳定计算

暂态稳定计算

本文根据图 3 所示流程编写了基于 CSO 算法 的 DWPPL 计算程序。根据算例问题的特点和复杂 程度,初始化 CSO 算法参数为:种群规模 30、最大迭 代次数 30、横向交叉概率 0.9、纵向交叉概率 0.8。 编码方式和交叉竞争算子皆参照文献[18]。在内 核为 Intel i7-6700 CPU@3.40 GHz 的台式机上运行 此程序,读入电网数据和 2 个风电场未来 3 h 的风 速数据后,花费 410 s 时间求得 T 时刻的最大  $N_w$  = [21,41],最大  $P_{ws}$  = 43.29 MW,优化过程见图 6。



CSO algorithm and GA

值得注意的是,在相同条件下,用文献[17]不 计暂态安全性约束的模型求得 T 时刻的最大  $P_{wz}$  = 58.24 MW,大于本文求得的 43.29 MW,由此说明不 计暂态安全约束求出的 DWPPL 结果是相对理想 的,按其值接入风电后若发生单相瞬时性故障,可能 使系统失去暂态安全性,这点可从图 5 中分析得出。

同理可以求得其他时步起始时刻的最大 P<sub>wΣ</sub>和

最大 N<sub>w</sub> 如表 4 所示 ( 假定风电场上报的风况均如 附录中所示 )。

	Table 4	DWFFL at an	terent times	
时止	已投负荷	已并网	最大 P <sub>wΣ</sub> /	最大 N
的少	总量/MW	机组	MW	цо Л IV w
4	172.0	G33 G36	43.29	[21,41]
5	214.5	G33 G36	47.71	[24,38]
6	226.5	G33 G36	48.55	[22,51]
7	241.5	G33 G36	49.61	[17,78]

表 4 不同时刻的 DWPPL Table 4 DWPPI at different time

由表4可知,系统承受风电的能力在随着系统的恢复而不断提高,风电穿透功率极限在黑启动过 程中是个动态值。

为说明本文采用 CSO 算法的优势,现以 GA 为 例,对比二者计算效果的差异。初始化 GA 参数为: 种群规模 30、最大迭代次数 30、交叉概率 0.6、变异 概率 0.1。在同样风况条件下求得 T 时刻最大  $N_w =$ [21,41],最大  $P_{ws} =$  43.29 MW,优化过程见图 6。

图 6 中平均值指的是种群中个体适应度的平均 值,最优值指的是种群中个体适应度的最大值。分 析图 6 可得如下结论:

**a.** 采用 CSO 算法和 GA 从同一起点搜索最大  $P_{w\Sigma}$ ,最终求得的最大  $P_{w\Sigma}$ 稳定且相同,均为 43.29 MW,这说明 2 种算法在该问题上的收敛性都是良好的。

**b.** GA 搜索到最大 *P*<sub>wx</sub>迭代了 15 代,花费时间 472 s;而 CSO 算法搜索到最大 *P*<sub>wx</sub>迭代了 11 代,花 费时间 410 s。由此可以证明 CSO 算法比 GA 在收 敛速度方面具有一定优势。

**c.** CSO 算法在前 7 代的迭代花费时间比 GA 多,这主要是因为初期 CSO 算法的横、纵向交叉操 作比 GA 的交叉、变异操作产生了更多的新个体,增 加了仿真校验的次数。

d.2种算法每代求解花费的时间都随着代数的 增加而减少,这是因为本文采用了"以空间换取时 间"的加速策略,记录了每次校验的结果,因此后期 产生的新个体几乎都可以通过查询已校验的结果来 判断其可行性,省去了仿真校验的时间花费。

值得说明的是,在黑启动初期系统的节点规模 较小,本文方法的求解速度基本能满足要求,而当系 统规模恢复至较大时,可以通过以下3种措施进一 步提高仿真速度:提高计算机的性能,比如采用大型 服务器来计算;利用系统等值缩小节点规模;采用分 布计算,充分发挥多台服务器的性能。随着计算机 性能和云计算技术的不断提高,仿真速度将不再是 瓶颈,未来的决策会越来越依赖高效的仿真技术。

## 4 结论和展望

为了使风电安全稳定地参与黑启动,进而加快

系统恢复进程,本文根据国家相关标准和技术规范, 建立了考虑系统暂态安全的 DWPPL 求解模型,编 制了基于 CSO 算法和 PSD-BPA 仿真的 DWPPL 自 动求解程序,实现了系统恢复过程中风电最大接入 容量的快速求解。本文主要结论如下:

a. 风电接入量过大会引起系统暂态安全性的明显下降,因此,求解 DWPPL 时计及系统暂态安全约束是必要的;

b. 在国家标准的基础上,采用二元表来表示暂态稳定性约束和暂态偏移可接受性约束,具有一定的工程应用价值;

c. 简化场景分析、并行仿真、以空间换取时间, 这3种措施对提高时域仿真校验速度有很好的效果;

**d.** 若要使风电更多地参与系统恢复,一方面需 要增强系统的调频稳压能力,另一方面也需要提高 风电机组的高频承受能力和低电压穿越能力。

本文重点研究了暂态安全约束对风电参与系统 恢复的限制,提出了众多约束条件下 DWPPL 的快 速求解方法。鉴于问题的复杂性,未再对风速的不 确定性进行考虑,更全面求解 DWPPL 的模型还需 要在本文模型的基础上,增加随机风况模型,找出易 发生的恶劣风况,再在该恶劣风况下用本文模型求 解 DWPPL,这些有待今后的进一步研究。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

## 参考文献:

[1]潘伟,李勇,曹一家,等. 用于大规模集中式风电并网的 VSC-HVDC 频率控制方法 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 94-99.

PAN Wei, LI Yong, CAO Yijia, et al. Frequency control of gridconnection system based on VSC-HVDC for large scale centralized wind farm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35 (5):94-99.

- [2]但扬清,刘文颖,朱艳伟,等.含大规模风电集中接入的电网自组织临界态辨识[J].电力自动化设备,2016,36(5):127-133.
   DAN Yangqing, LIU Wenying, ZHU Yanwei, et al. Self-organized critical state identification of power grid with centralized integration of large-scale wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(5):127-133.
- [3] FANG Q, MA L, YAN X, et al. The calculation of wind power penetration limit based on DC power flow algorithm [C] // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu, China: IEEE, 2010:1-4.
- [4] HAN X, YAN Y. Wind power penetration limit calculation based on power system reliability [C] // 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. Nanjing, China: IEEE, 2009:1-4.
- [5] 白玉东,王承民,衣涛,等. 电力系统的柔性评价与风电穿透功率极限计算[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):12-16.
   BAI Yudong, WANG Chengmin, YI Tao, et al. Flexibility assessment of power system and penetration limit calculation of wind power[J].
   Electric Power Automation Equipment,2012,32(10):12-16.
- [ 6 ] 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.

- [7] 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.
- [8] LIU L,SHI S,WANG G. The control strategy research of wind power and storage based on the black start[C] // China International Conference on Electricity Distribution. Shenzhen, China: IEEE, 2014: 979-982.
- [9] AKTARUJJAMAN M, KASHEM M A, NEGNEVITSKY M, et al. Black start with DFIG based distributed generation after major emergencies [C]//International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems. New Delhi, India; IEEE, 2007; 1-6.
- [10] 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.
- [11] 国家电网公司. 国家电网安全稳定计算技术规范:Q/GDW404—2010[S]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [12] 刘新东,江全元,曹一家,等. 基于风险理论和模糊推理的电力
   系统暂态安全风险评估[J]. 电力自动化设备,2009,29(2):
   15-20.

LIU Xindong, JIANG Quanyuan, CAO Yijia, et al. Transient security risk assessment of power system based on risk theory and fuzzy reasoning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(2): 15-20.

- [13] 国家电网公司.分布式电源接入电网技术规定:Q/GDW 1480—2015[S].北京:中国电力科学研究院,2016.
- [14] 国家电网公司.风电场接入电网技术规定:Q/GDW 1480—2015 [S].北京:中国电力科学研究院,2016.
- [15] 汤涌,卜广全,印永华,等. PSD-BPA 暂态稳定程序用户手册
   [M].北京:中国电力科学研究院,2008.
- [16] 侯佑华,房大中,齐军,等. 大规模风电人网的有功功率波动特 性分析及发电计划仿真[J]. 电网技术,2010,34(5):60-66.

HOU Youhua, FANG Dazhong, QI Jun, et al. Analysis on active power fluctuation characteristics of large-scale grid-connected wind farm and generation scheduling simulation under different capacity power injected from wind farms into power grid [J]. Power System Technology, 2010, 34(5):60-66.

- [17] MENG A B, CHEN Y C, YIN H, et al. Crisscross optimization algorithm and its application [J]. Knowledge-Based Systems, 2014, 67 (4):218-229.
- [18] 孟安波,梅鹏,卢海明. 基于纵横交叉算法的热电联产经济调度
   [J]. 电力系统保护与控制,2016,44(6):90-97.
   MENG Anbo, MEI Peng, LU Haiming. Crisscorss optimization algorithm for combined heat and power economic dispatch[J]. Power System Protection and Control,2016,44(6):90-97.
- [19] 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.

#### 作者简介:



叶 茂(1991—),男,江西赣州人,博士 研究生,主要研究方向为风电并网、新能源参 与系统恢复(E-mail:yemao@ncepu.edu.cn); 刘 艳(1973—),女,江西广丰人,教 授,博士,主要研究方向电力系统安全防御

与恢复技术智能技术在电力系统中的应 用、状态检修(**E-mail**:bd\_ly@263.net);

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防御和系统恢复、 电力系统安全稳定评估与控制、智能技术在电力系统中的 应用;

韩思聪(1993—),男,河北邢台人,硕士研究生,主要研 究方向为风电参与系统恢复;

王少博(1990—),男,河北保定人,硕士研究生,主要研 究方向为电力系统电压稳定和功角稳定。

## Calculation of dynamic wind power penetration limit considering system transient safety under background of blackout

YE Mao<sup>1</sup>, LIU Yan<sup>1</sup>, GU Xueping<sup>1</sup>, HAN Sicong<sup>1</sup>, WANG Shaobo<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Zhangjiakou Power Supply Company of State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Zhangjiakou 075000, China)

**Abstract**:DWPPL(Dynamic Wind Power Penetration Limit) represents the maximum wind power accommodation capability of power system at different restoration periods in the process of black start, the solution of which can guide the ordered access of wind power in the process of system recovery, and thus accelerate the recovery process relying on the advantages of small startup power and fast startup speed of wind power. In order to solve the DWPPL more accurately, the nonlinear integer programming model of DWPPL with the consideration of system transient security constraints is established, which uses two element table to describe the transient security constraints. A method based on crisscross optimization algorithm and PSD-BPA simulation is proposed for solving DWPPL. Aiming at a specific blackstart scheme of the IEEE 39-bus system with wind power, the DWPPL of each period is solved and the superiority of the algorithm is verified. The correctness of the obtained DWPPL and the necessity of considering the system transient safety are verified by the simulation on PSD-BPA.

Key words: dynamic wind power penetration limit; system restoration; transient safety; PSD-BPA; crisscross optimization algorithm

11/11	50	
111	~	
	-	

模型	PSD-BPA 卡	详细说明
水、火电	F+、FV GH(GS)、	采用 $E_{d}^{"}$ 、 $E_{q}^{"}$ 变化详细
机组	M、MG、	模型,并考虑励磁、
	SI、SI+	PSS 和调速系统
负荷	ML	采用 65% 感应电动机和 35% 恒阻抗负荷模型
风电机组	WINDG_GE	采用 GE 1500xle 型 DFIG 风力发电机模型
回由伊拉	RE、RE+、	采用低电压、过电压保护
风电床炉	RM、RM+	和低频、高频保护
风速	GV	采用正弦阵风模型, 模拟未来 3h 预测风速 中最恶劣的 2min 风速变化
故障	FLT	采用最大出力风电场主送电 通道上的单相瞬时性故障, 故障时刻为风电出力最大时
控制	FF	采用典型的计算控制模型, 步长为 0.5 周波, 共仿真 7000 周波

表 1 暂态安全约束校验时的参数设置 Table 1 Parameter setting in transient security constraint check

W18 和 W4 风电场在 T 时刻上报的未来 3h 风况数据因数据量较大,故不在此列出,附数据表格的下载网址: http://pan.baidu.com/s/1gfeLKoN。