

基于源网协同的风电并网系统双层优化调度

丁楠, 陈中, 胡吕龙
(东南大学电气工程学院, 江苏南京 210096)

摘要:在风电渗透率较高时, 多点接入的风电出力波动就会在整个电网中形成扰动, 威胁电网的安全稳定运行。针对风电的多点扰动带来的潮流全局窜动和局部涌动, 以常规机组出力、储能系统(ESS)充放电功率和可控串联补偿装置(TCSC)为调控手段, 建立了含风电场的源网协同双层调度模型。上、下层模型分别以全网潮流均衡度和关键断面潮流均衡度为优化目标, 采用多精英保留策略的遗传算法对所建模型交替迭代求解。含风电场的IEEE39节点系统算例验证了调度方法的可行性和有效性。

关键词:风电场; 波动; 潮流均衡度; 源网协同; 双层规划; 可控串联补偿装置

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2014)05-0006-05

风电存在随机性和间歇性, 随着风电渗透率的不断增加, 给电力系统的运行带来新的挑战^[1-2], 风电并网系统调度方法已经成为当前研究的热点。针对区域电网, 风电是从多个集中接入点接入电网, 在风电渗透率较高时, 多点扰动的风电或许不会对电网整体的有功平衡造成太大影响, 但它会造成电网中潮流分布的重大变化, 带来新的系统安全运行问题。

目前针对高渗透风电并网系统调度主要从全局性出发, 控制手段主要是通过电源侧的常规火电、常规水电、风电的联合控制以保证系统安全经济运行。文献[3]考虑风电出力不确定性对备用和线路潮流的影响, 建立了计及风电备用和线路安全约束的有功经济调度模型; 文献[4]建立了风—水—火电联合调度的多目标优化模型与算法, 以充分利用清洁能源、降低系统运行成本、保证火电机组运行效率; 文献[5]以电网安全条件风险价值作为电网安全指标, 取代一般调度模型中的安全约束, 来描述风电随机性给电网运行带来的风险; 文献[6]在提出采用基于随机模拟、神经网络和遗传算法的混合智能算法得到常规电厂出力数据的动态经济调度方法。文献[7]提出通过与风电机组紧密关联的AGC机组的实时偏差控制对功率波动进行调整的策略。

目前针对局部性调度已经开展的工作主要集中于可再生能源并网点及其衍生的较小区域, 抑制手段主要通过并网点储能的配置, 文献[8-9]利用离散傅里叶变换对可再生能源输出功率进行频谱分析, 确定不同类型的储能系统(ESS)所需补偿的功率变化的时间尺度, 有效地平抑了可再生能源输出功率的波动。文献[10]通过基于小波变换的算法利用储能平抑了风电的波动。文献[11]以基于标准差基础上的改进

数学熵的衡量指标对风—光—储系统进行优化, 减小了系统的峰谷差和波动性。

文中建立的双层调度模型, 上层模型以调度周期内全网潮流均衡度为优化目标, 以常规机组的出力为调控手段, 保证整个电网的潮流分布的均衡性和安全稳定; 下层模型以调度周期内关键断面潮流均衡度为优化目标, 以ESS充放电功率和可控串联补偿装置(TCSC)为调控手段, 保证这些关键断面的潮流分布的均衡性, 从而巩固了整个电网的安全稳定状态。采用多精英保留策略的遗传算法对所建模型交替迭代求解, 最终取得上、下层模型都满意的解。

1 潮流分布均衡性的描述

电力系统的运行状态在时刻变化着, 导致电网中每条线路的负载率也在不断变化。文献[12]考虑线路潮流安全限制, 以线路负载率的方差定义电网运行的均衡度并将其作为安全指标, 通过求解系统经济、安全协调的双目标问题确定优化调度。文献[13]以线路负载率为指标, 分析了在不同调度方式下, 安全经济调度、输电能力及其分布间的关系。因此, 文中将潮流均衡度引入含风电场的调度。

设线路*i*的最大有功传输容量为 P_i^{\max} , 系统运行时线路*i*实际潮流为 P_i , 则线路*i*的负载率 μ_i 为:

$$\mu_i = \left| \frac{P_i}{P_i^{\max}} \right| \quad i=1, 2, L, N_l \quad (1)$$

式中: N_l 为线路数。

目前, 描述潮流均衡性的模型有2种: 方差模型^[12]和潮流熵^[14]模型。文中选取方差来描述潮流的均衡性, 并定义*D*为潮流均衡度, 其数学表达式如式(2)所示:

$$D = \frac{1}{N_l} \sum_{i=1}^{N_l} (\mu_i - \bar{\mu})^2 \quad (2)$$

收稿日期: 2014-04-20; 修回日期: 2014-05-30

国家高技术研究发展计划(863计划)自助项目(2011AA05A105); 国家自然科学基金自助项目(51177019)。

式中: $\bar{\mu} = \frac{1}{N_l} \sum_{i=1}^{N_l} \mu_i$ 为电网中所有线路的平均负载率。

电力系统运行时,当所有线路的负载率都相同时,电网潮流处于最均衡的状态,整个电网的潮流均衡度就是0;当有的线路负载率很大,而有的线路负载率很小时,整个电网的潮流均衡度就很大,潮流窜动明显,容易发生连锁故障。整个电网的潮流均衡度反映的是整个电网潮流的综合水平,具有全局性。当系统的关键断面中的线路的负载率都相同时,断面中的潮流分布就处于最均衡的状态,关键断面的潮流均衡度就是0;当断面中有的线路负载率很大,而有的负载率很小时,潮流涌动突出,线路的利用率就不合理,关键断面的潮流均衡度就很大。关键断面的潮流均衡度反映的是断面中潮流的分布情况,具有局部性。文中应用全网潮流均衡度表征风电并网系统的全局潮流窜动特性,应用关键断面潮流均衡度表征局部潮流涌动特性。

2 TCSC 的工作原理与数学模型

TCSC 是可控串联补偿的实现方案之一,也是最为成熟和使用最广的可控串联补偿的实现方案。TCSC 可以快速连续地改变所补偿的输电线路的等值电抗,因而在一定的运行范围内,可以将此线路的输送功率控制为期望的常数。在暂态过程中,通过快速地改变线路等值电抗,从而提高系统的稳定性。TCSC 的构造形式很多,原理结构如图1所示。与机械开关控制的补偿装置相比,晶闸管控制补偿装置可以实现串联补偿度的快速调节,其性能可以满足电力系统稳定控制和快速潮流控制的需要。

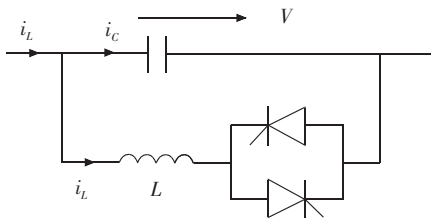


图1 TCSC 原理结构

风电场接入系统中,可能会经过多条线路构成的断面向系统传输功率,这些线路类似于并联的关系。风电场功率的波动使这些线路上的功率也在不断波动,可能出现有些线路的负载率很高,有些线路的负载率却很低这种功率分配不合理的现象。因此,在风电场出口处这些并联的线路上装设 TCSC,通过这些 TCSC 的协调控制,将风电场出口处断面的潮流均衡性保持在理想的状态。

文中主要分析电力系统的稳态行为和潮流控制,因此采用 TCSC 的稳态模型,TCSC 在可调运行状态下可等效为串联在输电线路中的可变电抗 X_{TCSC} ,线路

电抗变为^[15]:

$$\begin{cases} X'_{ij} = X_{ij} + X_{TCSC} \\ X_{TCSC} = -\beta X_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

式中: X_{ij}, X'_{ij} 分别为补偿前和补偿后的支路电抗; β 为 TCSC 对支路电抗的补偿度。

3 含风电场的双层调度模型

文中所建立的双层协同调度模型,上层模型以调度周期内的全网潮流均衡度为优化目标,以常规发电机组的有功出力为决策变量;下层模型以调度周期内关键断面潮流均衡度为优化目标,以 ESS 充放电功率和 TCSC 为决策变量。上层优化后的方案成为下层规划的初始变量,下层规划在此基础上将下层优化方案传递到上层求解,由此反复,直到满足要求的最优方案出现。

3.1 双层规划理论

双层规划(BLPP)是一种具有二层递阶结构的系统优化问题,上层问题和下层问题都有各自的决策变量、约束条件和目标函数。双层规划的一般形式为^[16]:

$$\begin{cases} \min F(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \text{s.t. } G(\mathbf{x}) \leq 0 \\ \min f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \text{s.t. } g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $F(g)$ 为上层规划目标函数, $F: R^{n_1+n_2} \rightarrow R$; $G(g)$ 为上层规划约束条件集合, $G: R^{n_1} \rightarrow R^{m_1}$; $\mathbf{x} \in R^{n_1}, \mathbf{y} \in R^{n_2}$; $f(g)$ 为下层规划目标函数, $f: R^{n_1+n_2} \rightarrow R$; $g(g)$ 为下层规划约束条件集合, $g: R^{n_1+n_2} \rightarrow R^{m_2}$ 。双层规划模型中,上层决策问题是主问题,下层决策在上层给定决策下行动;上、下层决策通过传递最优解的方式相互影响,在满足各自约束条件时,实现上、下层的相互作用,取得上、下层都满意的解。

3.2 上层规划

上层规划的目标函数为:

$$\min F = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T D_t \quad (5)$$

式中: F 为一个调度周期的全网潮流均衡度的平均值; D_t 为时段 t 的全网潮流均衡度; T 为研究周期内的小时数,文中取 24,即研究日前调度计划。

上层约束集合为功率平衡约束、支路传输容量约束、常规机组有功出力约束、常规机组爬坡速率约束和系统的上、下旋转备用约束等。

(1) 功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^{N_G} S_{G_i,t} + \sum_{j=1}^{N_W} S_{W_j,t} + \sum_{k=1}^{N_E} P_{E_k,t} = S_{D,t} + S_{L,t} \quad (6)$$

式中: N_G 为系统中常规机组的台数; $S_{Gi,t}$ 为常规机组 i 在时段 t 的输出复功率; N_W 为系统中风电场总数; $S_{Wj,t}$ 为风电场 j 在时段 t 的输出复功率; N_E 为系统中 ESS 的总数; $P_{Ek,t}$ 为第 k 个 ESS 在时段 t 的目标输出有功功率(为负表明吸收有功功率); S_{Dt} 为时段 t 的负荷值; S_{Lt} 为时段 t 的网损值。

(2) 支路传输容量约束:

$$|P_{l,t}| \leq P_l^{\max} \quad (7)$$

式中: $P_{l,t}$ 为线路 l 在时段 t 的传输功率; P_l^{\max} 为线路 l 的传输功率上限。

(3) 常规机组出力约束:

$$\begin{cases} P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi,t} \leq P_{Gi}^{\max} \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi,t} \leq Q_{Gi}^{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{Gi,t}$ 和 $Q_{Gi,t}$ 分别为常规机组 i 在时段 t 的有功出力和无功出力; P_{Gi}^{\max} , P_{Gi}^{\min} 分别为常规机组 i 有功出力的上、下限; Q_{Gi}^{\max} 和 Q_{Gi}^{\min} 分别为常规机组 i 无功出力的上、下限。

(4) 常规机组爬坡速率约束:

$$R_{dt}^G \Delta t \leq P_{Gi,t} - P_{Gi,t-1} \leq R_{ut}^G \Delta t \quad (9)$$

式中: R_{ut}^G , R_{dt}^G 分别为常规机组 i 有功出力的最大上升速率和下降速率; Δt 为一个时段的长度, 单位为 h。

(5) 系统的上、下旋转备用约束:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_G} (P_{Gi}^{\max} - P_{Gi,t}) \geq R_w^S \\ \sum_{i=1}^{N_G} (P_{Gi,t} - P_{Gi}^{\min}) \geq R_{dt}^S \end{cases} \quad (10)$$

式中: R_w^S 和 R_{dt}^S 分别为系统在时段 t 的上、下旋转备用要求, 一般取系统总负荷的 5%。

3.3 下层规划

下层规划, 通过上层规划传递下来的常规机组的有功出力安排 T 个时段的 ESS 的充放电功率和 TCSC 的补偿度, 使调度周期内的关键断面潮流均衡度为最小, 即:

$$\min f = \max \{ \bar{D}_1, \bar{D}_2, L, \bar{D}_{N_s} \} \quad (11)$$

式中: N_s 为电网中关键断面的数量; 目标分量 \bar{D}_m 为调度周期内第 m 个关键断面的潮流均衡度的平均值, 即:

$$\bar{D}_m = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T D_{m,t} \quad (12)$$

式中: $D_{m,t}$ 为电网中第 m 个关键断面在时段 t 的潮流

均衡度。

下层约束集合包括 TCSC 补偿度范围约束、ESS 充放电功率约束、ESS 充放电等式约束和 ESS 稳定运行约束。

(1) TCSC 补偿度范围约束:

$$\beta_n^{\min} \leq \beta_{n,t} \leq \beta_n^{\max} \quad (13)$$

式中: $\beta_{n,t}$ 为第 n 个 TCSC 在时段 t 的补偿度; β_n^{\max} 和 β_n^{\min} 分别为第 n 个 TCSC 补偿度范围的上、下限。

(2) ESS 充放电功率约束:

$$-P_{Ec,k}^{\max} \leq P_{Ek,t} \leq P_{Ed,k}^{\max} \quad (14)$$

式中: $P_{Ec,k}^{\max}$ 和 $P_{Ed,k}^{\max}$ 分别为第 k 个 ESS 充、放电的最大功率。

(3) ESS 充放电等式约束:

$$S_{Ek,t} = \begin{cases} S_{E,k,t-1} - \frac{P_{Ek,t} \Delta t}{\eta_{E,d}} & P_{Ek,t} > 0 \\ S_{E,k,t-1} & P_{Ek,t} = 0 \\ S_{E,k,t-1} - \eta_{E,c} P_{Ek,t} \Delta t & P_{Ek,t} < 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $S_{Ek,t}$ 为第 k 个 ESS 在时段 t 结束时刻的容量; $\eta_{E,c}$ 和 $\eta_{E,d}$ 分别为 ESS 的充电效率和放电效率, 假定 $\eta_{E,c} = \eta_{E,d} = \sqrt{\eta_E}$, η_E 为 ESS 的综合充放电效率。考虑到充放电功率损耗, 在放电时, ESS 实际放电功率扣除损耗后需满足所需放电功率的要求, 其值为所需放电功率除以放电效率; 在充电时, ESS 实际充电功率为所需充电功率扣除充电损耗后的值, 应为所需充电功率乘以充电效率。

(4) ESS 稳定运行约束:

$$\sum_{t=1}^T \frac{P'_{Ek,t} \Delta t}{3600} = 0 \quad (16)$$

式中: $P'_{Ek,t}$ 为第 k 个 ESS 实际充、放电的功率, 当 $P'_{Ek,t} \geq 0$ 时, $P'_{Ek,t} = P_{Ek,t} / \eta_d$, 当 $P'_{Ek,t} < 0$ 时, $P'_{Ek,t} = \eta_c P_{Ek,t}$; $\Delta t / 3600$ 的意义是将时间单位 s 折算为 h。

4 求解方法及流程

多精英保留策略的遗传算法是一种新型的多目标算法, 从出现以来因其简单有效性和比较明显的优越性以及可供下载的免费源码, 得到了大量的引用, 已经成为进化优化领域的基准算法之一。文中提出将多精英保留策略的遗传算法应用于电力系统优化, 并取多个算例进行了测试, 计算结果表明, 多精英保留策略的遗传算法收敛性和鲁棒性好。采用多精英保留策略的遗传算法对所建模型交替迭代求解^[17]。具体求解流程如图 2 所示。

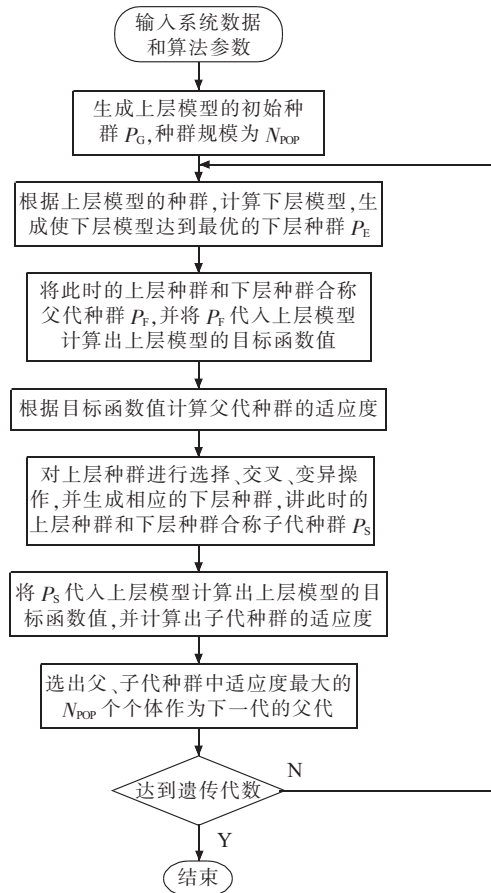


图2 含风电场的双层调度模型的求解流程

5 算例分析

文中以改进的新英格兰 10 机 39 节点测试系统^[18]为例,对文中方法进行仿真验证。节点 31 为平衡节点。分别在节点 32、33 和 35 接入风电场,装机容量都为 5.0 p.u.。10 台常规机组的参数如表 1 所示,爬坡率上限均为 0.6 p.u./h,爬坡率下限均为 -0.6 p.u./h。分别在 3 个风电场中装设相同型号的 ESS,容量为 5.0 p.u.。最大充、放电功率均为 1.5 p.u./h 和 3.0 p.u./h。ESS 的综合充放电效率为 95%。遗传算法参数如下:上、下层模型的群体规模分别为 100 和 50,遗传代数均为 500,交叉概率均为 0.9,变异概率均为 0.1。

表 1 常规机组参数

机组	有功上限 /p.u.	有功下限 /p.u.
30	3	0.9
31	5	1.5
32	4	1.2
33	3	0.9
34	6	1.8
35	5	1.5
36	3	0.9
37	5	1.5
38	5	1.5
39	6	1.8

将线路 10-11 和 10-13 构成的断面、线路 19-16 和 19-20 构成的断面、线路 22-21 和 22-23 构成的断面定义为关键断面 S1, S2 和 S3。关键断面内的 TCSC 的补偿度范围均为 -0.2~0.3。

经过遗传迭代计算,上下层模型的目标函数值分别为 0.274 2 和 0.008 3。调度周期内,全网潮流均衡度曲线如图 3 所示,电网的潮流就处于最均衡的状态,处于最安全的状态。关键断面 S1, S2, S3 内线路在调度周期内的负载率分别如图 4、图 5 和图 6 所示。

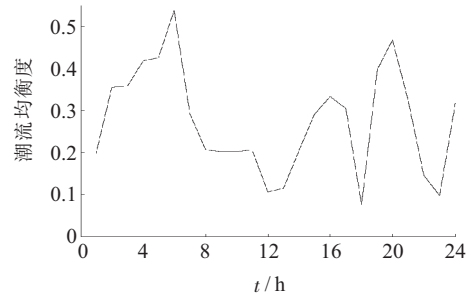


图3 调度周期内全网潮流均衡度曲线

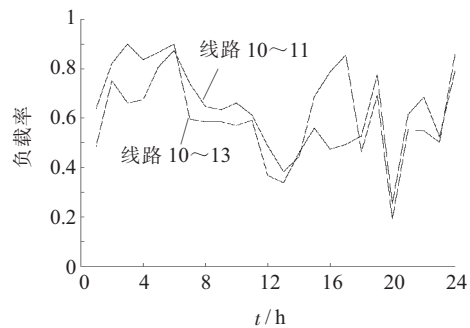


图4 关键断面 S1 内线路在调度周期内的负载率

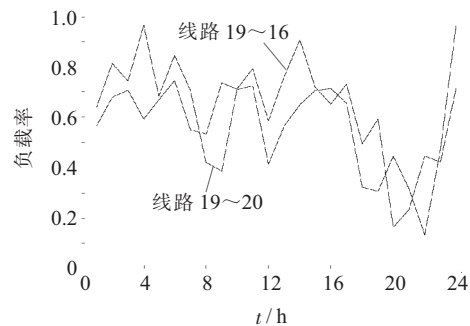


图5 关键断面 S2 内线路在调度周期内的负载率

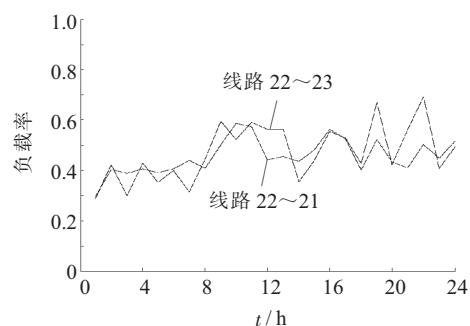


图6 关键断面 S3 内线路在调度周期内的负载率

此时关键断面中的线路在各调度时段的负载率接近,线路容量利用率接近,使关键断面尽可能地处于最安全的状态。可见,通过 TCSC 的协调控制,关键断面的潮流分布的比较均衡。

6 结束语

将 TCSC 考虑到电力系统调度中,建立了基于源网协同的风电并网系统双层优化调度模型。通过常规机组出力、ESS 充放电功率和 TCSC 的协调控制,较好地解决了风电波动带来的潮流扰动问题。并将双层规划理论引入到含风电场的电力系统调度中,从整体和局部两方面保证潮流的均衡性,并采用多精英保留策略的遗传算法对所建模型交替迭代求解。采用含风电场的源网协同双层调度方法,可以增强系统的安全性,优化系统的潮流分布,减小线路的潮流波动,满足了系统运行调度的要求。在文中所构建的模型中加入负荷侧的调控作用,是有待进一步研究的重要问题。

参考文献:

- [1] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 84-89.
- [2] 秦旭东. 大规模风电接入对江苏电网调频影响与对策研究[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(4): 6-12.
- [3] 夏 澍, 周 明, 李庚银. 考虑线路安全校验的含风电电力系统有功和备用协调调度[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 18-26.
- [4] 王开艳, 罗先觉, 吴 玲, 等. 清洁能源优先的风—水—火电力系统联合优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 27-35.
- [5] 周任军, 姚龙华, 董小娇, 等. 采用条件风险方法的含风电系统安全经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 56-63.
- [6] 孙元章, 吴 俊, 李国杰, 等. 基于风速预测和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 41-47.
- [7] 陈 宁, 于继来. 基于电气剖分信息的风电系统有功调度与控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 51-58.
- [8] 王成山, 于 波, 肖 峻, 等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 1-8.
- [9] 王成山, 于 波, 肖 峻, 等. 平滑微电网联络线功率波动的储能系统容量优化方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 12-17.
- [10] JIANG Q Y, HONG H S. Wavelet-based Capacity Configuration and Coordinated Control of Hybrid Energy Storage System for Smoothing out Wind Power Fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1363-1372.
- [11] 陈 中, 胡吕龙, 丁 楠. 基于改进熵的风光储互补并网系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 86-91.
- [12] 孙 欣, 吕跃春, 高 军, 等. 电网经济性与安全性的精益协调方法[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 12-17.
- [13] 张 强, 韩学山, 徐建政. 安全经济调度与均匀调度间关系分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(2): 84-89.
- [14] 曹一家, 王光增, 曹丽华, 等. 基于潮流熵的复杂电网自组织临界态判断模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 1-6.
- [15] 潘淑杰, 马 平, 蔡兴国, 等. 用于提高输电能力的 TCSC 选址和定容方案[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 65-70.
- [16] 刘宝碇, 赵瑞清, 王 纲. 不确定规划及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 8-10.
- [17] 冯士刚, 艾 芊. 带精英策略的快速非支配排序遗传算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 146-151.
- [18] PAI M A. Energy Function Analysis for Power System Stability [M]. Kluwer Academic Publishers, 1989.

作者简介:

- 丁 楠(1990), 男, 江苏射阳人, 硕士研究生, 研究方向为风电并网优化运行技术;
- 陈 中(1975), 男, 江苏丹阳人, 博士, 研究员, 从事电力系统稳定运行与控制、新能源并网优化运行技术的研究;
- 胡吕龙(1988), 男, 安徽东至人, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网优化运行技术。

A Bi-level Optimal Dispatching Approach for Grid-connected Wind Power Based On Source-grid Collaboration

DING Nan, CHEN Zhong, HU Lyulong

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: When the penetration of wind power is high, the fluctuations of the output of the wind farm with multipoint accesses becomes disturbance to the power grid. It threatens the safety and stability of the power grid. Aimed at the overall volatility and local surge of power flow, a bi-level optimal dispatching approach for grid-connected wind power based on source-grid collaboration and control of conventional units, ESSs and TCSC is proposed. The objectives of the upper and the lower models are to optimize the overall power flow and the key interfaces' power flow, respectively. The methods for solving the upper and the lower models are both the genetic algorithm with multi-elitist preservation method. The simulations on the IEEE 39 test system including wind farms validate the proposed dispatching method.

Key words: wind farm; fluctuation; power flow homogeneousness; source-grid collaboration; bi-level programming; thyristor controlled series compensation