

考虑决策风险的含 UPFC 多目标最优潮流计算

李斌¹, 刘建坤², 李群², 杨光¹, 卫志农³, 何天雨⁴, 张清松³

(1. 国网南京供电公司, 江苏 南京 210019; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 3. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 4. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 211102)

摘要:随着大规模风电场的并网,其不确定性会给电力系统的稳定性带来极大的挑战,而统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)作为最全面的柔性交流输电(flexible AC transmission system, FACTS)装置,具有强大的潮流控制能力。文中利用 UPFC 协调风电的不确定性,建立考虑决策风险的含 UPFC 多目标最优潮流模型,并对 IEEE-14 节点系统进行算例分析。结果表明,所提模型能够得到各时段各场景下的较好决策并减少发电机来不及调整的风险性。

关键词:决策风险;统一潮流控制器;风电不确定性

中图分类号:TM62

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)01-0019-07

0 引言

风电是具有可再生性的绿色清洁能源,但同时存在随机性、间歇性等缺点,随着其在电网中的渗透率日益提高,有可能导致电压越限、潮流越限等问题,对电力系统的安全稳定构成威胁^[1-4]。而统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)作为目前通用性最好的柔性交流输电(flexible AC transmission system, FACTS)装置,具有多种控制功能,能快速、灵活地调整电网参数,为电网调度提供新的手段^[5-6]。目前,我国第一套 UPFC 也是世界上第一套基于模块化多电平的 UPFC 示范工程于 2015 年 12 月 11 日在江苏南京西环网顺利投运^[7-8]。2016 年 11 月 3 日,全球电压等级最高、容量最大的江苏苏州南部电网示范工程正式开工建设,计划 2017 年底建成投运。因此,文中考虑利用 UPFC 来协调风电的不确定性。

在含有风电的系统中,风电出力发生波动时,实际发电总成本同期望的成本会产生较大偏差,将这种偏差情况作为决策风险性。期望成本的偏差意味着发电机组出力的偏差,而由于风电的波动,极有可能发生不同场景间机组调节能力不足的情况。因此,为了降低潜在的决策风险性,有必要考虑决策风险对优化运行带来的影响。基于上述分析,建立考虑决策风险的含 UPFC 的多目标最优潮流模型,通过算例分析验证文中所提模型的准确性。

1 UPFC 稳态模型

UPFC 一般采用双电压源模型^[9],其模型结构如图 1 所示,主要由并联可控电压源 \dot{U}_E 、阻抗 Z_E 、串联可控电压源 \dot{U}_B 和阻抗 Z_B 组成。假设 UPFC 安装在线路 $s-m$ 的 s 端,可以通过在 UPFC 末端增加一个节点 r ,使得 UPFC 成为独立支路,然后参与计算。通过合理控制串、并联侧可控电压源幅值和相角,灵活地实现 UPFC 的电压调节、线路串联补偿以及移相等多种功能。

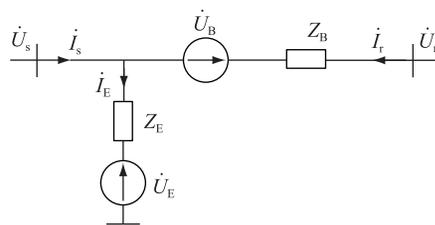


图 1 UPFC 的双电压源模型

Fig.1 Dual voltage source model of UPFC

在具体计算过程中,可将 UPFC 对系统的影响等效为对其所在支路两端节点的注入功率 $P_{sr} + jQ_{sr}$, $P_{rs} + jQ_{rs}$, 等效示意图如图 2 所示,等效注入功率可用式(1)表示:

$$\begin{cases} P_{sr} + jQ_{sr} = \dot{U}_s \dot{i}_s^* = \dot{U}_s (\dot{i}_E - \dot{i}_r)^* \\ P_{rs} + jQ_{rs} = \dot{U}_r \dot{i}_r^* \end{cases} \quad (1)$$

2 考虑决策风险含 UPFC 多目标最优潮流

投资组合理论中称投资结果对期望收益的偏差为投资风险,借鉴该概念,将优化调度带来的成

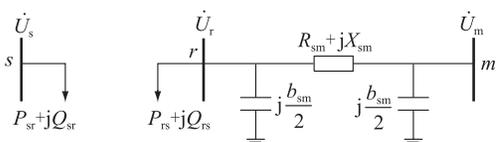


图2 UPFC 支路等效示意图

Fig.2 Equivalent schematic diagram of UPFC branch

本偏差称为决策风险。常用的最小化期望成本的模型由于没有考虑风电不确定性因素的影响,并不能体现隐藏的决策风险,当遇到风电不确定性影响较大即偏差较大的场景时可能会使电网蒙受重大损失。在投资理论中,衡量风险最常用的模型是均值-方差模型,即用方差刻画决策的风险性^[10-11],文中参考投资理论采用期望-方差的目标函数来衡量决策风险。

2.1 模型

(1) 目标函数。考虑决策风险性的最优潮流应当权衡优化的期望值和方差,因此该模型中目标函数有2个。首先设定每个场景每个时段的发电费用为:

$$\xi_{[s,t]} = \sum_{i=1}^{n_g} a_{2i} P_{Gi[s,t]}^2 + a_{1i} P_{Gi[s,t]} + a_{0i} \quad (2)$$

式中: $P_{Gi[s,t]}$ 为场景 s 下机组 i 在时段 t 的有功出力; a_{2i} , a_{1i} , a_{0i} 为第 i 台发电机发电费用系数; n_g 为系统发电机数。

那么,目标函数一为多场景多时段下的平均发电费用,即发电机发电费用的期望值,表达式如下:

$$f_1(x) = \sum_{s \in S} p_s \sum_{t \in T} \xi_{[s,t]} / n_{\text{Time}} \quad (3)$$

式中: S 为描述场景的集合; T 为描述时段的集合; p_s 为描述场景概率的集合; n_{Time} 为时段数量,一般为24个时段。

目标函数二为多场景多时段下的发电费用方差,表达式如下:

$$f_2(x) = \frac{\sum_{s \in S} p_s \left[\sum_{t \in T} (\xi_{[s,t]} - \sum_{s' \in S} p_{s'} \sum_{t' \in T} \xi_{[s',t']} / n_{\text{Time}})^2 \right]}{n_{\text{Time}}} \quad (4)$$

(2) 等式约束。考虑决策风险性的多目标最优潮流模型的等式约束和不等式约束同常规最优潮流约束条件类似,但由于文中所建立模型是建立多场景以及多时段的基础上,因此对于每个场景每个时段约束条件都应该能够满足要求。

等式约束包含节点功率平衡方程和 UPFC 内部有功功率平衡方程。其中,普通节点的功率平衡方程在此不作详述。UPFC 所在线路两端节点的功率平衡方程和 UPFC 内部有功平衡方程如式(5—6)

所示。

$$\begin{cases} \Delta P_{i[s,t]} = P_{Gi[s,t]} - P_{Li} - U_{i[s,t]} \sum_{j \in i} U_{j[s,t]} \times \\ (G_{ij} \cos \theta_{ij[s,t]} + B_{ij} \sin \theta_{ij[s,t]}) - P_{i,\text{upfc}[s,t]} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \Delta Q_{i[s,t]} = Q_{Gi[s,t]} - Q_{Li} - U_{i[s,t]} \sum_{j \in i} U_{j[s,t]} \times \\ (G_{ij} \sin \theta_{ij[s,t]} - B_{ij} \cos \theta_{ij[s,t]}) - Q_{i,\text{upfc}[s,t]} \end{cases} \quad (6)$$

$$P_{E[s,t]} + P_{B[s,t]} = 0 \quad (6)$$

式中: i 取 s 或 r , j 的取值集合为 $\{1, 2, 3, \dots, n\}$; $[s, t]$ 中的场景 $s \in S$, 时段 $t \in T$ 。

(3) 不等式约束。不等式约束包括发电机约束、节点电压约束、线路潮流约束及 UPFC 运行约束。

$$\begin{cases} P_{Gi,\min} \leq P_{Gi[s,t]} \leq P_{Gi,\max} \\ -d_{Gi} \leq P_{Gi[s,t]} - P_{Gi[s,t-1]} \leq u_{Gi} \\ Q_{Gi,\min} \leq Q_{Gi[s,t]} \leq Q_{Gi,\max} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} U_{i,\min} \leq U_{i[s,t]} \leq U_{i,\max} \\ \theta_{i,\min} \leq \theta_{i[s,t]} \leq \theta_{i,\max} \\ |P_{ij[s,t]}| \leq P_{ij\max} \\ U_{E,\min} \leq U_{E[s,t]} \leq U_{E,\max} \\ \theta_{E,\min} \leq \theta_{E[s,t]} \leq \theta_{E,\max} \\ U_{B,\min} \leq U_{B[s,t]} \leq U_{B,\max} \\ \theta_{B,\min} \leq \theta_{B[s,t]} \leq \theta_{B,\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $U_{E,\max}$, $U_{E,\min}$, $U_{B,\max}$, $U_{B,\min}$ 分别为 UPFC 并联、串联电压源幅值上、下限; $\theta_{E,\max}$, $\theta_{E,\min}$, $\theta_{B,\max}$, $\theta_{B,\min}$ 分别为 UPFC 并联、串联电压源相角上、下限。

2.2 基于法线边界交叉法的求解方法

多目标问题在一开始是通过权重法求解,主要思想是将其转化为一个单目标问题,再利用数学规划进行求解,由于每次只能设定一个权值,所以每次只能得到一种权值情况下对于该问题的最优解。另外,由于目标函数的单位普遍不同以及约束通常非线性、不可微等一系列限制,对于选取的权重值也较敏感。

另一种求解多目标问题的思路是找寻到一系列的帕累托 (Pareto) 最优解,决策者只需根据需要从 Pareto 前沿上选择出合适的解。在多个目标函数间权衡折衷的过程就可以用这个选择的过程来代表。这个方法相较于普通设定权重的方法具有较高的实用性,在各个领域的优化问题方面得到普遍应用。

一般求解多目标问题的方法包括约束法,智能算法(遗传算法、粒子群算法等)以及法线边界交叉法(normal boundary intersection, NBI)。除 NBI 法以外的算法不仅可能无法得到均匀分布的 Pareto 前

沿,还可能致使最优解集不够准确,而采用法线边界交叉法可以得到准确且均匀的 Pareto 前沿^[12-13]。

根据前文所述,选用法线边界交叉法进行多目标的求解,具体步骤介绍如下。

首先写出如下形式的确定性多目标优化模型:

$$\begin{cases} \min f_1(x) \\ \min f_2(x) \\ \text{s.t. } h(x) = 0 \\ \underline{g} \leq g(x) \leq \bar{g} \end{cases} \quad (9)$$

式中: x 为优化变量; $h(x)$, $g(x)$ 分别为该多目标优化问题的等式和不等式约束条件; \bar{g} , \underline{g} 为不等式约束的边界条件。

由于所提多目标优化模型为典型的非线性优化模型,而原对偶内点法是求解非线性规划的有效方法,具有较高的计算精度和较快的收敛性。因此文中采用原对偶内点法求解上述模型,首先对该多目标问题的两个目标函数分别进行单目标最优潮流计算,为方便之后的求解,提前对两个单目标函数进行规范化,记为 \bar{f}_1 和 \bar{f}_2 ,公式如下:

$$\begin{cases} \bar{f}_1 = (f_1 - f_{12}) / (f_{11} - f_{12}) \\ \bar{f}_2 = (f_2 - f_{22}) / (f_{21} - f_{22}) \end{cases} \quad (10)$$

式中: f_{ij} 表示当以第 i 个目标函数做单目标优化时第 j 个目标函数的解。

在规范化的空间内,乌托邦线斜率为 -1 ,其法向量为 $\bar{n} = [-\sqrt{2}/2, -\sqrt{2}/2]^T$,两个端点分别为 $(0,1)$ 和 $(1,0)$ 。引入参数 β 为乌托邦直线上任意一点 A 的横坐标,那么点 A 的坐标为 $(\beta, 1-\beta)$,其中 $0 \leq \beta \leq 1$ 。如图 3 所示。

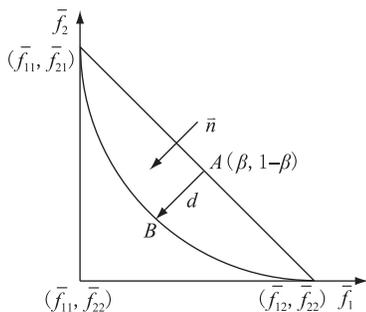


图 3 规范化乌托邦直线与 Pareto 前沿

Fig.3 Normalized Utopia line and Pareto front

图 3 中坐标原点 $(\bar{f}_{11}, \bar{f}_{22})$ 即为乌托邦点,从多目标最优解的含义出发, Pareto 前沿离 $(\bar{f}_{11}, \bar{f}_{22})$ 越近则解越优,因此该多目标问题可以转化为最大化图中距离 d 的一个单目标优化问题,转化后的单目标优化公式如式(11)。

$$\begin{cases} \max d \\ \text{s.t. } \begin{bmatrix} -\sqrt{2}/2 \\ -\sqrt{2}/2 \end{bmatrix} d + \begin{bmatrix} \beta - 1 \\ 1 - \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{f}_1 - 1 \\ \bar{f}_2 - 0 \end{bmatrix} \\ h(x) = 0 \\ \underline{g} \leq g(x) \leq \bar{g} \end{cases} \quad (11)$$

式中:参数 β 是乌托邦直线上任意一点 A 的横坐标,可以将区域 $[0,1]$ 平均划分为 20 份或者 10 份来确定 β 的值。那么该多目标问题便可以转化为一列目标函数为 d 的单目标优化问题。

2.3 算法流程

利用原对偶内点法求解上述转换后的单目标优化模型,具体流程如图 4 所示。

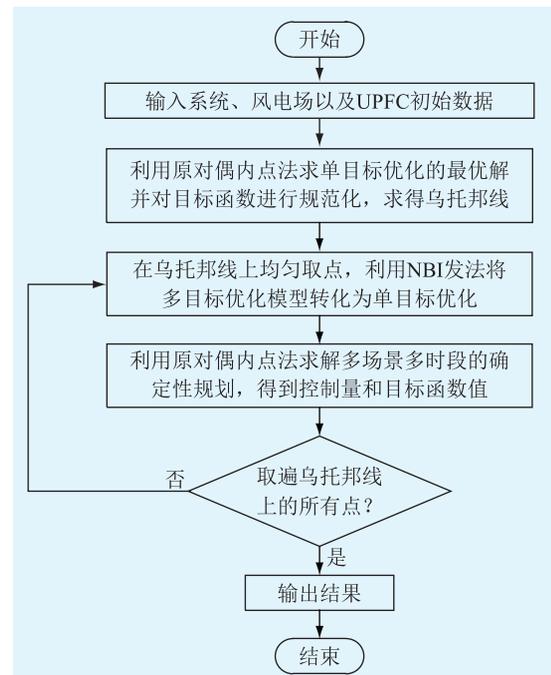


图 4 基于 NBI 的多目标优化流程

Fig.4 Multi objective optimization flow chart based on NBI

3 算例分析

3.1 测试算例说明

针对文中所提模型及求解方法,对 IEEE-14 节点系统进行修改。UPFC 安装于线路 4—5 的节点 4 侧,风电接在节点 9,新增节点 15。系统拓扑如图 5 所示。

以文献[14]中的历史数据作为风速预测值进行计算分析,选取 ALGONA 地区 2010 年 7 月 4 日 24 h 整点的风速数据作为预测值,并以整点的风速代表这 1 h 的风速,详细数据见附表。同样假定某一整点的风速服从以预测值为期望,以预测值的 5% 为标准差的正态分布。对每个期望值采用文献

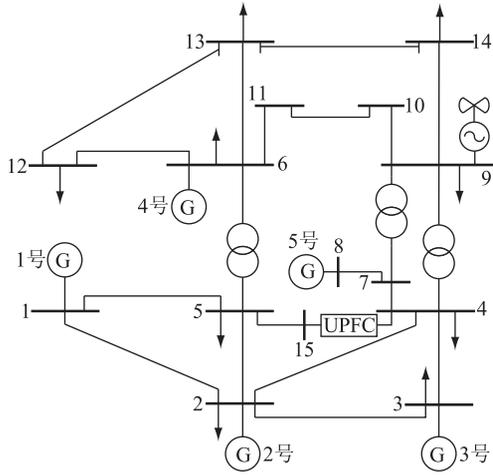


图5 加装 UPFC 和风电后的 IEEE-14 系统拓扑
Fig.5 Topological diagram of IEEE-14 system after installing UPFC and wind power

[15]中介绍的基于概率距离最短的场景削减方法得到 N_s 组场景,文中取 N_s 为 5。

假定风电场额定功率 $P_r = 80$ MW,切入风速 $v_{in} = 3$ m/s,额定风速 $v_r = 12$ m/s,切出风速 $v_{out} = 25$ m/s。附表中 S1~S5 为削减得到对应 5 个场景下的各时段风电场出力。

3.2 算法性能测试

以修改后含有风电场和 UPFC 的 IEEE-14 节点系统为例,为表明多目标优化的协调决策性能,构造 3 种优化方案进行比较分析。

方案 1:以发电费用最小作为单目标的优化;

方案 2:以发电费用方差最小作为单目标优化;

方案 3:以发电费用及其方差最小作为多目标的优化。

方案 3 中,双目标优化利用 NBI 法进行多目标求解,选取 Pareto 曲线上 11 组最优解,如表 1 所示。进而画出该多目标问题的 Pareto 前沿,如图 6 所示。其中 Pareto 前沿的两个端点分别为以发电费用最小和发电费用方差最小作为单目标的优化结果。

通过观察图 6 能够发现,法线边界交叉法能够得到准确且均匀分布的 Pareto 前沿,即作出的 Pareto 前沿上的每个点都是一个最优解。在实际的系统运行调度中,操作人员可以依据实际的需要选择 Pareto 前沿对应的最优解来确定多目标优化下的运行方案。

为保证选择决策方案的客观性,参考文献[16]中提到的熵权法来确定最优解集中的最优决策方案,进而再将选择的多目标最优方案作为方案 3 同方案 1 和方案 2 下的结果进行比较。最终所得 3 种方案下的优化结果如表 2 所示。

表 1 多目标优化 Pareto 曲线数据

Tab. 1 Multi objective optimization of Pareto curve data

β	d	发电费用 f_1 /万元	发电费用方差 f_2 /万元 ²
0	0	6 054.252	1 242 491.432
0.1	0.072	6 149.067	1 054 730.181
0.2	0.138	6 253.496	873 126.141
0.3	0.194	6 369.990	699 250.635
0.4	0.239	6 502.492	535 629.410
0.5	0.269	6 655.490	385 137.248
0.6	0.281	6 833.208	250 480.210
0.7	0.268	7 044.985	137 640.167
0.8	0.222	7 301.207	53 270.900
0.9	0.133	7 617.651	7 477.365
1.0	0	7 993.907	0

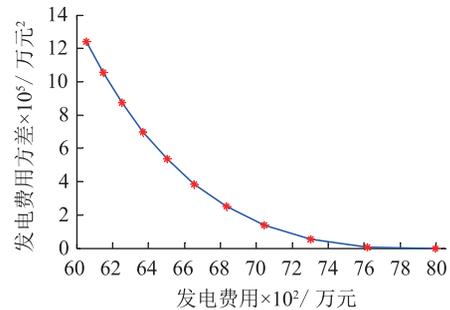


图 6 多目标问题的 Pareto 前沿

Fig.6 Pareto front of multi objective problem

表 2 3 种方案的优化结果

Tab. 2 Optimization results of three schemes

优化方案	发电费用/ 万元	发电费用方 差/万元 ²	发电费用标 准差/万元
方案 1	6 054.252	1 242 491.432	1 114.671
方案 2	7 993.907	0	0
方案 3	6 833.208	250 480.210	500.480

从表 2 中可以看出,方案 1 单纯考虑节省发电费用,会导致不同场景不同时段间的发电费用方差较大,增大了机组调整出力的风险性;而方案 2 仅考虑降低各场景各时段下的发电费用方差,甚至能够达到方差为 0,减少了机组调节的风险性但却使得系统的发电费用增加;方案 3 为多目标协调决策的结果,该方案综合考虑了发电费用最小和发电费用的方差最小,所得决策在每个场景每个时段均是较好的,更具有现实意义。

为进一步验证所建立的多目标模型考虑决策风险性的能力,分别对 3 种方案下各场景各时段的发电机出力以及 UPFC 的控制参数进行算例测试。图 7 为 IEEE-14 节点测试系统中发电机 2 的出力

示意图。

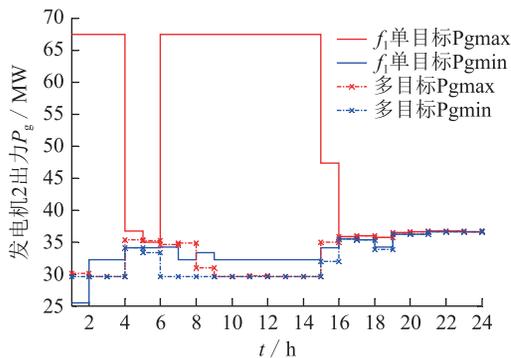


图7 IEEE-14节点系统发电机2的出力示意图

Fig.7 Schematic diagram of output power of generator 2 in IEEE-14 node system

图7中,沿场景来看,多目标优化时各场景下的最大最小出力较单目标来说更加紧凑,表明多目标的最优解虽然对于各个风电场景来说不是最优解但均为接近最优的解,发电机出力在某时段的不同场景间均无需做过多的调节;沿时段来看,单目标优化时各个时段发电机2的出力变化较大,而多目标优化时发电机2的出力能够保持在比较平稳的范围内,这表明加上方差最小作为目标函数优化后,能够使各时段发电机出力的调节更加平稳,减少了发电机来不及调整的风险。

最后对多目标优化下UPFC串联等效电压源的幅值 U_B 在不同场景不同时段取值进行分析研究,如图8所示。可以看到在对应风速波动性较小的时段1—3、时段8—14以及时段19—24,UPFC串联等效电压源的幅值在各个场景下没有较大改变,但是在风速波动性较大的时段4—7、时段15以及时段18,UPFC串联等效电压源的幅值 U_B 的调节范围有所扩大。

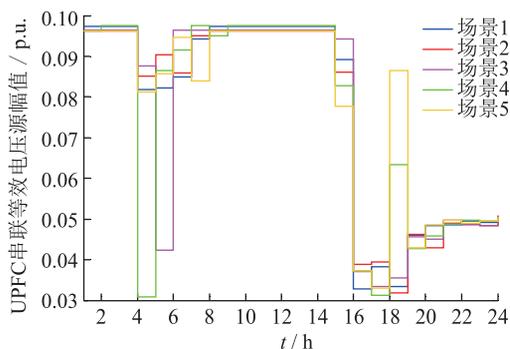


图8 多目标优化下 U_B 在不同场景及时段的取值

Fig.8 The value of multi objective optimization in different scenarios and periods

在上述风速波动较大的时段下 U_B 调节的最大、最小值如表3所示。

表3 风速波动较大时段 U_B 的取值

Tab.3 Value of wind speed fluctuation period

时段	4	5	6	7	15	18
U_{Bmax}	0.088	0.090	0.096	0.098	0.094	0.087
U_{Bmin}	0.031	0.042	0.085	0.084	0.078	0.032

4 结论

文中建立了考虑决策风险的计及风电和UPFC的多目标最优潮流模型,并通过IEEE-14节点进行算例分析验证模型的有效性,得到以下结论:

(1) 利用UPFC调节的快速性和灵活性可有效应对风电波动带来的不确定性,根据风速变化实时匹配预先得到的优化方案,为现代电网调度自动化系统提供了决策保障;

(2) 以经济性为目标的单目标优化有可能导致机组出力频繁或者大幅的调整,考虑决策风险性的多目标优化兼顾了经济性和机组的爬坡特性,从而尽可能减小了因风速变化过快而机组滞后响应而造成的停电风险。

参考文献:

- [1] 孙元章, 吴俊, 李国杰. 风力发电对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(20): 55-62.
SUN Yuanzhang, WU Jun, LI Guojie. Influence research of wind power generation on power systems [J]. Power System Technology, 2007, 31(20): 55-62.
- [2] 王深哲, 高山, 尤国伟, 等. 考虑多安全性约束的风电场穿透功率极限研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(3): 57-61.
WANG Shenzhe, GAO Shan, YOU Guowei, et al. Wind penetration limitation research considered multiple security constraints [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3): 57-61.
- [3] 罗钢, 杨银国, 钱峰. 含风电场的电力系统动态关键输电断面分析[J]. 广东电力, 2016, 29(10): 54-61. LUO Gang, YANG Yinguo, QIAN Feng. Dynamic key power transmission sections of power systems integrated with Wind farms [J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(10): 54-61.
- [4] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 77-81.
CHI Yongning, LIU Yanhua, WANG Weisheng, et al. Influence of wind power integration on power system [J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 77-81.
- [5] 周玲, 王宽, 钱科军, 等. 计及UPFC的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 37-41.
ZHOU Ling, WANG Kuan, QIAN Kejun, et al. Reactive power optimization of power system considering UPFC [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 37-41.
- [6] 钱臻, 刘建坤, 陈静, 等. 基于自动微分技术的含UPFC电力系统最优潮流[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(4): 24

- 29.
QIAN Zhen, LIU Jiankun, CHEN Jing, et al. Optimal power flow with UPFC based on automatic differentiation[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(4): 24-29.
- [7] 祁万春, 杨林, 宋鹏程, 等. 南京西环网 UPFC 示范工程系统级控制策略研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 92-96.
QI Wanchun, YANG Lin, SONG Pengcheng, et al. UPFC system control strategy research in Nanjing western power grid [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 92-96.
- [8] 陈刚, 李鹏, 袁宇波. MMC-UPFC 在南京西环网的应用及其谐波特性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 121-127.
CHEN Gang, LI Peng, YUAN Yubo. Application of MMC-UPFC on Nanjing western grid and its harmonic analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 121-127.
- [9] ENRIGUE ACHA, CLAUDIO R FUERTE-ESQUIVEL, HUGO AMBRIZ-PEREZ, et al. FACTS modeling and simulation in power networks[M]. John Wiley & Sons Ltd, 2004:200-216.
- [10] KHOSRAVI A, NAHAVANDI S, CREIGHTON D, et al. Wind farm power uncertainty quantification using a mean-variance estimation method[C]// 2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON). Auckland, 2012: 1-6.
- [11] 刘燕武, 张忠楨. 基于实际收益率分布的均值-方差-条件风险价值多目标投资优化模型[J]. 系统管理学报, 2010, 19(4): 444-450.
LIU Yanwu, ZHANG Zhongzhen. Mean-variance-cvar portfolio optimization model based on real return distribution [J]. Journal of Systems and Management, 2010, 19(4): 444-450.
- [12] ROMAN C, ROSEHART W. Evenly distributed pareto points in multi-objective optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 1011-1012.
- [13] 陈霜, 孙国强, 卫志农, 等. 计及碳排放的含风电场电力系统随机可用输电能力协调决策[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 405-411.
CHEN Shuang, SUN Guoqiang, WEI Zhinong, et al. Coordinated stochastic available transfer capability decision-making considering Carbon emission with wind Farm integration [J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 405-411.
- [14] Iowa Environmental Mesonet. AWOS download data[EB/OL]. [2015-08-18]. <http://mesonet.agron.iastate.edu/request/awos/1min.php>. 2011-04-01.
- [15] 钱臻, 刘建坤, 陈静, 等. 计及风电不确定性的含 UPFC 电力系统的两阶段最优潮流[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 80-86.
QIAN Zhen, LIU Jiankun, CHEN Jing, et al. Two stage optimal power flow of power system with UPFC considering wind power uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 80-86.
- [16] 罗毅, 李昱龙. 基于熵权法和灰色关联分析法的输电网规划方案综合决策[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 77-81.
LUO Yi, LI Yulong. Comprehensive decision-making of transmission network planning based on entropy weight and grey relational analysis [J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 77-81.

作者简介:



李斌

李斌(1963—),女,研究员级高级工程师,从事电力系统调度规划、智能电网技术前瞻应用工作(E-mail: cyyxzs@163.com);

刘建坤(1980—),男,硕士,研究员级高级工程师,从事电力系统运行优化、柔性交流输电技术工作(E-mail: jiankun-liu@163.com);

李群(1967—),男,博士,研究员级高级工程师,从事电力系统运行优化、柔性交流输电技术、电能质量等工作。

Multi-objective Optimal Power Flow Calculation Incorporating UPFC Considering Decision Risk

LI Bin¹, LIU JianKun², LI Qun², YANG Guang¹, WEI Zhinong³, HE Tianyu⁴, ZHANG Qingsong³

(1. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

3. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

4. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China)

Abstract: With the large-scale integration of wind farms, the uncertainty of wind power poses great threat to the stability of power system. The Unified Power Flow Controller (UPFC) has been the most comprehensive Flexible AC Transmission System (FACTS) device ever since. It is advanced in power flow controlling. In this paper, UPFC is deployed to coordinate with wind power uncertainty. A multi-objective optimal power flow model incorporating UPFC is established to tackle with decision risk. Case studies on IEEE 14-bus system show that optimal decisions can be obtained by solving the proposed model and, most of all, risks can be reduced.

Key words: decision risk; unified power flow controller; wind power uncertainty

(编辑 钱悦)

附录 A

ALGONA 地区 2010 年 7 月 4 日 24 时段风速及风电出力数据如下:

附表 A1 各场景各时段的风速数据								$m \cdot s^{-1}$
场景	1	2	3	4	5	6	7	8
预测值	14	13	10	10	11	11	13	14
S1	12.745 4	12.079 8	9.954 1	9.978 8	10.213 3	11.464 2	13.139 2	13.669 5
S2	13.440 8	12.709 2	9.251 8	10.344 2	10.833	12.015 3	11.534 7	13.968 3
S3	14.768 9	12.588 8	10.194 1	10.683 1	10.397 9	11.706	14.200 2	14.693 4
S4	14.603 7	13.320 7	9.885 4	10.255 8	11.325 2	10.074 9	14.198 1	14.181
S5	13.587 1	13.911 7	10.383 2	9.405 2	12.048 5	12.146 6	14.026 6	13.588
场景	9	10	11	12	13	14	15	16
预测值	14	13	14	17	14	11	8	9
S1	14.359 3	12.979 3	12.882 1	17.718 8	14.014 8	10.651 4	9.014	8.297 8
S2	15.126 3	13.244 1	15.304 7	16.067 7	13.234 2	10.380 4	8.431 1	9.220 9
S3	15.377	11.963 4	12.579 1	14.041 8	12.977	10.378 5	8.209 7	8.106 2
S4	13.799 3	13.251 2	12.323 3	18.217 6	13.577	9.771 4	8.417 2	9.002 5
S5	12.766 2	12.341 3	13.852 3	17.069 8	14.043 9	11.174 5	8.456 8	8.957 7
场景	17	18	19	20	21	22	23	24
预测值	9	7	7	6	6	6	5	13
S1	8.945 8	7.022 7	6.466 9	6.375 5	5.766 3	5.986 6	5.313 7	12.372 3
S2	9.567 3	7.594 7	7.059 1	6.263 4	5.626 9	5.788 8	5.184 9	11.843 7
S3	9.144 8	6.963 7	7.573 4	6.133	6.199 1	6.499 6	4.571 3	13.012 5
S4	10.481 4	7.573 8	6.326 2	5.595 3	6.118 3	5.798	4.956 5	13.202 3
S5	8.673 2	7.092 7	7.214 1	5.554 6	6.403 3	6.462 6	4.871	13.983
附表 A2 各场景各时段的风电出力数据								MW
场景	1	2	3	4	5	6	7	8
S1	80.000	80.000	47.433	47.776	51.091	70.653	80.000	80.000
S2	80.000	80.000	38.204	52.989	60.386	80.000	71.850	80.000
S3	80.000	80.000	50.815	58.067	53.778	74.799	80.000	80.000
S4	80.000	80.000	46.486	51.703	68.323	49.121	80.000	80.000
S5	80.000	80.000	53.562	40.135	80.000	80.000	80.000	80.000
场景	9	10	11	12	13	14	15	16
S1	80.000	80.000	80.000	80.000	80.000	57.582	35.306	27.266
S2	80.000	80.000	80.000	80.000	80.000	53.521	28.684	37.822
S3	80.000	79.343	80.000	80.000	80.000	53.493	26.349	25.291
S4	80.000	80.000	80.000	80.000	80.000	44.937	28.535	35.169
S5	80.000	80.000	80.000	80.000	80.000	65.841	28.962	34.636
场景	17	18	19	20	21	22	23	24
S1	34.496	15.519	11.427	10.814	7.159	8.394	4.929	80.000
S2	42.227	20.382	15.809	10.085	6.428	7.280	4.370	77.213
S3	36.886	15.055	20.189	9.269	9.678	11.650	2.168	80.000
S4	55.017	20.193	10.490	6.268	9.179	7.331	3.462	80.000
S5	31.351	16.079	17.073	6.064	10.998	11.398	3.149	80.000