

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190498

## 基于直流潮流的 UPFC 优化配置研究

刘畅<sup>1</sup>, 吴军<sup>1</sup>, 郝露茜<sup>1</sup>, 王智冬<sup>2</sup>, 张艳<sup>2</sup>, 李保林<sup>1</sup>, 徐剑冰<sup>1</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209)

**摘要:** 在电力系统中采用 UPFC 装置可以调节线路潮流分布以及改善经济成本, 因此在输电线路规划中, UPFC 优化配置问题有比较高的研究价值。在 UPFC 直流潮流模型基础上, 忽略功率损耗和无功功率, 以发电机的经济成本作为目标函数建立 UPFC 优化配置数学模型, 并采用 Big-M 法对其非线性潮流方程进行处理。将混合整数非线性规划问题转化为适应更多求解器的混合整数线性规划问题, 对统一潮流控制器在线路中的安装位置和容量进行寻优。在 Matlab 中利用算例进行仿真计算, 验证了该模型和策略的正确性和有效性。

**关键词:** 直流潮流; 统一潮流控制器; 发电成本; 混合整数线性规划; 仿真模型

### Optimization configuration research of UPFC based on DC power flow

LIU Chang<sup>1</sup>, WU Jun<sup>1</sup>, HAO Luxi<sup>1</sup>, WANG Zhidong<sup>2</sup>, ZHANG Yan<sup>2</sup>, LI Baolin<sup>1</sup>, XU Jianbing<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

**Abstract:** The UPFC device in the power system can adjust the line current distribution and improve the economic cost. Therefore, the UPFC optimization configuration problem has a relatively high research value in the transmission line planning. Based on the UPFC DC power flow model, this paper ignores the power loss and reactive power, establishes the UPFC optimization configuration mathematical model with the economic cost of the generator as the objective function, and uses the Big-M method to process its nonlinear power flow equation. The method transforms integer nonlinear programming problem into a mixed integer linear programming problem that adapts to more solvers, and the installation position and capacity of the unified power flow controller in the line are optimized. The simulation calculations are carried out in Matlab using examples to verify the correctness and effectiveness of the model and strategy.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. B3440818K005).

**Key words:** DC power flow; UPFC; power generation cost; MILP; simulation model

## 0 引言

电力市场的重组和可再生能源接入, 电力行业正在经历技术、经济和组织问题的深刻变革, 现代电力系统结构在不断优化的同时也要考虑到日益增加的电力消耗、低预测性的电力流动和可再生能源的广泛采用导致电网拥堵程度增加<sup>[1-4]</sup>。电力系统扩展作为减轻传输压力的一种基本手段, 涉及新建电厂和关键区域新增输电线路, 建设成本高, 施工时间长。而柔性交流输电系统(FACTS)的提出极大地改善了电力系统的潮流控制能力。通过安装功率潮流

控制设备, 能够改变有效传输线电抗, 从而将功率转移到附近未充分利用的传输线路, 来增加在该线路上传输的功率<sup>[5-7]</sup>。

统一潮流控制器 UPFC(Unified Power Flow Controller)作为目前柔性交流输电家族中应用最广泛的装置之一, 结合多种装置优良性能, 不仅可以调节线路传输功率, 还可以改变系统的功率分布来实现系统的优化运行, 凭借其灵活性和精确性获得电力行业的广泛关注, 因此研究如何实现 UPFC 的优化配置对电力规划者有着重要意义<sup>[8-9]</sup>。

关于 UPFC 在电网中的配置问题, 目前已有部分研究成果。文献[10]通过搭建 UPFC 的负荷模型求得其灵敏度表达式, 从而判断该值大小来确定其

安装位置。文献[11]选取网损、UPFC 安装成本等多个参数作为优化目标, 利用 NSGA-II 算法进行求解。文献[12]基于 UPFC 功率注入模型来建立综合考虑多目标的优化模型, 定义了 UPFC 控制变量与线路功率之间的灵敏度表达式, 来进行 UPFC 的选址定容策略研究。文献[13]结合了粒子群算法和遗传算法两种智能算法, 以静态安全水平作为目标函数建立优化数学模型, 由此来研究 UPFC 的安装位置和配置容量。文献[14]将 UPFC 对网络的影响以等效注入功率模型表示, 采用模态分析法来确定系统的薄弱区域, 从而建立 UPFC 控制参数对负荷因子的灵敏度, 根据灵敏度的大小确定 UPFC 最优安装策略。上述文献大部分从灵敏度角度来考虑装置的配置方法, 可以归于寻找系统中薄弱节点问题, 此外更加偏向采用算法的创新来进行优化, 通过选取和对比不同智能算法的优劣来确定不同的选址定容策略。原则上, 确定 UPFC 的最佳位置很简单。对于每个可能位置, 我们在其中放置一个 UPFC 的电力系统模型并计算成本节约以及运营成本即可<sup>[15]</sup>。然而原计划模型是大规模混合的整数非线性规划 (MINLP) 模型, 对于实际系统来说很难解决。需要采用简化模型进一步减轻计算负担, 提高寻优能力。

本文采用 UPFC 直流潮流模型, 忽略功率损耗和无功功率, 以发电机的经济成本作为目标函数建立 UPFC 优化配置数学模型, 并采用 Big-M 法对其非线性潮流方程进行处理, 将混合整数非线性规划问题转化为适应更多求解器的混合整数线性规划问题, 最后在 Matlab 中对该方法进行仿真验证。

## 1 UPFC 等效直流潮流模型

### 1.1 直流潮流

潮流计算作为电力系统分析的一项基础计算, 通常可分为直流潮流和交流潮流。从数学角度而言, 交流潮流计算实质是求解一组非线性的潮流方程组, 如牛顿-拉夫逊法、快速分解法等, 其数学模型相对完整且计算精度较为准确<sup>[16-18]</sup>。

对于  $n$  节点的电力系统, 节点注入功率方程式

$$\begin{aligned} P_i &= V_i \sum_{j \in i} V_j (B_{ij} \sin \theta_{ij} + G_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ Q_i &= V_i \sum_{j \in i} V_j (-B_{ij} \cos \theta_{ij} + G_{ij} \sin \theta_{ij}) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $j \in i$  是指节点  $i$  附近相邻的其他节点  $j$ ;  $P_i$  和  $Q_i$  指节点  $i$  的有功功率和无功功率;  $V_i$  和  $V_j$  是节点电压大小;  $B_{ij}$  和  $G_{ij}$  是两节点之间的互电纳和互电导。对该非线性方程组进行迭代直至收敛可得到:

$$\begin{aligned} P_{ij} &= V_i V_j (B_{ij} \sin \theta_{ij} + G_{ij} \cos \theta_{ij}) - V_i^2 G_{ij} \\ Q_{ij} &= -V_i V_j (B_{ij} \cos \theta_{ij} - G_{ij} \sin \theta_{ij}) + V_i^2 B_{ij} \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $P_{ij}$  和  $Q_{ij}$  是节点  $i$  和  $j$  之间线路的有功潮流。

直流潮流在交流潮流模型上忽略线路电阻以及支路的无功潮流来求解线性方程。因此式(2)化简成为

$$\begin{aligned} P_{ij} &= \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{ij}} \\ Q_{ij} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $x_{ij}$  是线路电抗。式(3)为线性方程组, 直流潮流不考虑无功, 其系统中各节点电压幅值近似相等。

尽管大部分场合都采用交流潮流模型, 但其计算步骤繁琐、计算时间长。因此, 在一些情况下可利用直流潮流解法的迅速性和线性化来简化分析。例如系统规划设计时、实时安全分析中、经济调度等场合, 采用直流潮流算法可充分发挥其优越性, 借助直流潮流优越性, 通过构造 UPFC 的直流潮流注入模型, 有利于将 UPFC 选址定容问题由非线性规划模型转换为混合整数线性规划模型, 便于求得其最优解。

### 1.2 UPFC 模型等效

UPFC 在电力系统稳定方面实现潮流调节, 提高线路的输送能力, 实现优化运行。

图 1 中,  $V_1$ 、 $V_0$ 、 $I_1$ 、 $I_0$  分别是 UPFC 输入输出的电压与电流,  $V_T$ 、 $I_T$  分别是注入变流器的串联电压和并联电流。

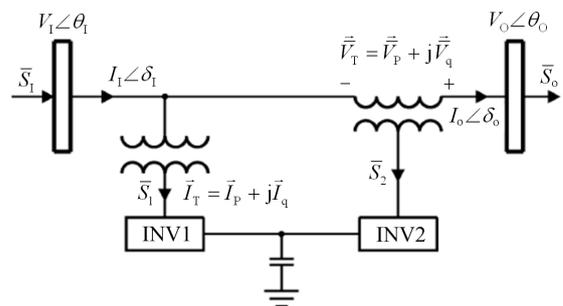


图 1 UPFC 简化模型

Fig. 1 Simplified UPFC model

将串联注入电压  $V_T$  相对于电流  $I_0$  分解为同相分量  $V_p$  与正交分量  $V_q$ , 同理将并联注入电流  $I_T$  进行正交分解为  $I_p$  和  $I_q$  两个分量。因此, 装置 UPFC 的输出电压和电流可写为:

$$\dot{V}_0 = \dot{V}_1 + \dot{V}_T = V_1 e^{j\theta_1} + V_p e^{j\delta_0} + jV_q e^{j\delta_0} \quad (4)$$

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 - \dot{I}_T = I_1 e^{j\delta_1} - I_p e^{j\delta_0} - jI_q e^{j\delta_0} \quad (5)$$

因此, 串联变压器注入传输线的功率分解为有功功率和无功功率两种形式

$$S_T = V_p \cdot I_o + jV_q \cdot I_o \quad (6)$$

其中, 有功功率  $P_T$  (可能是负值) 由分流变压器电流  $I_p$  所提供, 因此可得一个关于理想 UPFC 的关系式:

$$V_1 \cdot I_p = V_p \cdot I_o \quad (7)$$

由上式可知, 在忽略 UPFC 装置本身损耗下, 其有功输入等于有功输出, 而无功不平衡, UPFC 的可调变量对系统的影响直接移植到节点之间的线路上。

图 2 为 UPFC 在直流潮流中的等效稳态模型,  $x_{ij}$  为节点  $i$  和  $j$  之间线路电抗,  $x_a$  为注入该线路 UPFC 的可变电抗。

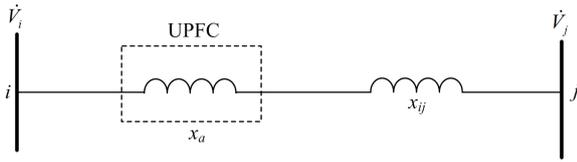


图 2 UPFC 稳态等效模型

Fig. 2 UPFC steady-state model

## 2 优化配置数学模型

### 2.1 目标函数

UPFC 最优潮流的目标函数可表示为

$$\min \Phi = \sum_{i=1}^{N_G} c_i P_{Gi} \quad (8)$$

式中:  $\Phi$  为系统总发电成本;  $c_i$  为每台发电机对应的经济参数;  $N_G$  为系统中发电机集合;  $P_{Gi}$  为每台发电机节点  $i$  的有功出力。在不考虑投资成本情况下, 采用发电机发电成本来评价其经济效益。

### 2.2 优化约束

1) 在前文所提出的直流模型中不考虑无功, 但对节点  $i$  需要保持其有功功率平衡。

$$\sum_{a \in \Omega_i} P_a = \sum_{m \in \Pi_i} P_{Lm} \quad (9)$$

式中:  $\Omega_i$  为与节点  $i$  相连线路;  $\Pi_i$  为节点  $i$  所载负荷。在图 2 中, 由于在线路  $a$  上安装 UPFC 装置, 所引入的等效电抗  $x_a$  与线路原电抗  $x_{ij}$  串联, 传输线  $a$  上的有功功率为

$$P_a = \frac{\theta_a}{x_{ij} + \delta_a x_a} \quad (10)$$

式中:  $\theta_a$  为线路两端相角差;  $\delta_a$  为引入的二进制变量来指示是否在传输线上安装 UPFC。

### 2) 静态安全约束

除了上面提到的功率方程作为等式约束之外, 还存在一系列由状态变量和控制变量约束组成的不等式约束, 如发电机出力约束、UPFC 控制容量约束、传输线热极限约束等。

$$\theta_i = 0, i \in B_{ref} \quad (11)$$

$$-S_a^{max} \leq P_a \leq S_a^{max} \quad (12)$$

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad (13)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i \leq \theta_i^{max} \quad (14)$$

$$P_{ij} \leq P_{ij}^{max} \quad (15)$$

$$x_{a \min} \leq x_a \leq x_{a \max} \quad (16)$$

式中:  $B_{ref}$  为参考节点;  $S_a^{max}$  为传输线  $a$  上的极限功率;  $P_{Gi}^{max}$ 、 $P_{Gi}^{min}$  为发电机有功功率的上下限;  $P_{ij}^{max}$  为线路传输的热稳定极限。限制(11)使参考节点的相角度为 0, 不等式(12)和(13)分别考虑的是传输线上的热稳定极限和发电机输出的有功功率限制, 式(16)控制 UPFC 的补偿容量在正常范围下波动。

## 3 模型转化

在前文所提到的原始 UPFC 优化数学模型基础上, 其目标函数以及约束条件存在非线性项, 需要利用重构技术, 将大规模混合整数非线性规划 (MINLP) 模型转换为混合线性规划 (MILP) 模型, 从而进一步减轻计算负担<sup>[19-22]</sup>。现采用 Big-M 法来完成其线性化过程。文献[23]正是采用基于 big-M 的互补约束, 将原始的非凸模型转换为混合整数模型, 但未考虑每条线路自身引入的 UPFC 可变量对总阻抗的影响, 无法对安装位置进行具体寻优, 因此不妨对单条线路设置 0-1 变量来得到位置的决策信息。

Big-M 法是一种用于求解规划问题的有效方法, 通过引入若干个 0-1 二进制变量, 可以将原非线性不等式约束转化为混合整数线性约束。

令  $x_a = \frac{\lambda}{1-\lambda} x_{ij}$  引入输入变量  $\lambda$  便于线性化。

式(10)转变为

$$P_a = \frac{\theta_a}{x_{ij}} - \frac{\theta_a}{x_{ij}} \cdot \lambda \cdot \delta_a \quad (17)$$

$$\lambda_{min} \leq \lambda \leq \lambda_{max}$$

为了线性化非线性项, 引入虚拟变量

$\psi_a = \frac{\theta_a}{x_{ij}} \cdot \lambda \cdot \delta_a$ , 式(17)改写为

$$P_a = \frac{\theta_a}{x_{ij}} - \psi_a \quad (18)$$

$$\lambda_{\min} \frac{\delta_a}{x_{ij}} \leq \frac{\psi_a}{\theta_a} \leq \lambda_{\max} \frac{\delta_a}{x_{ij}}$$

此时引入二进制变量  $\tau_a$  并使用 Big-M 法来线性化上式。

$$\begin{aligned} -M_a \tau_a + \lambda_{\min} \cdot \theta_a \cdot \frac{\delta_a}{x_{ij}} &\leq \psi_a \leq \lambda_{\max} \cdot \theta_a \cdot \frac{\delta_a}{x_{ij}} + M_a \tau_a \\ -M_a (1 - \tau_a) + \lambda_{\max} \cdot \theta_a \cdot \frac{\delta_a}{x_{ij}} &\leq \psi_a \leq \lambda_{\min} \cdot \theta_a \cdot \frac{\delta_a}{x_{ij}} + M_a (1 - \tau_a) \end{aligned} \quad (19)$$

式中:  $\psi_a$  的波动范围取决于跨越传输线  $a$  的相角差的符号;  $\tau_a$  取值与传输线  $a$  的功率流动方向有关。在整个优化过程中, 两个约束中有且只有一个是处于活动状态, 另一个约束将始终满足。其中  $M_a$  取足够大的正数, 但该参数不能选得过大, 以免造成搜索范围过大从而会影响求解效率。

在式(19)中, 依旧存在一个混合二进制线性项  $\theta_a \delta_a$ , 由一个连续变量  $\theta_a$  和二进制变量  $\delta_a$  相乘所得, 因此引入一个变量  $\beta_a = \theta_a \delta_a$  来继续线性化过程, 同样再次使用 Big-M 法对  $\beta_a$  进行约束。

$$-\theta_a^{\max} \delta_a \leq \beta_a \leq \theta_a^{\max} \delta_a \quad (20)$$

$$\theta_a - (1 - \delta_a) \theta_a^{\max} \leq \beta_a \leq \theta_a + (1 - \delta_a) \theta_a^{\max}$$

上式可改写为

$$-M_a \tau_a + \frac{\lambda_{\min}}{x_{ij}} \beta_a \leq \psi_a \leq \frac{\lambda_{\max}}{x_{ij}} \beta_a + M_a \tau_a \quad (21)$$

$$-M_a (1 - \tau_a) + \beta_a \frac{\lambda_{\max}}{x_{ij}} \leq \psi_a \leq \beta_a \frac{\lambda_{\min}}{x_{ij}} + M_a (1 - \tau_a)$$

因此, 非线性潮流方程组(10)转换成混合整数线性规划模型。采用 Big-M 法处理后的非线性约束条件经转换后成为线性约束(18)、(20)、(21)。

在上述约束条件下, 来对目标函数求解, 经过松弛后, 将 UPFC 最佳选址定容研究转换为混合线性规划问题, 可以采用 cplex-YALMIP 工具包来求解大规模 MILP 问题。

## 4 算例分析

为了验证本文所提出的优化策略的有效性, 分别在搭建的 2 机 5 节点系统以及 IEEE-118 节点系统中对 UPFC 选址及容量优化进行仿真分析。通过读入原始数据, 包括网络结构数据以及各控制变量在内所组成的不等式约束的上下限, 在约束范围内来求解最优解。

2 机 5 节点系统结构如图 3 所示, 其中节点参数详见文献[24]。

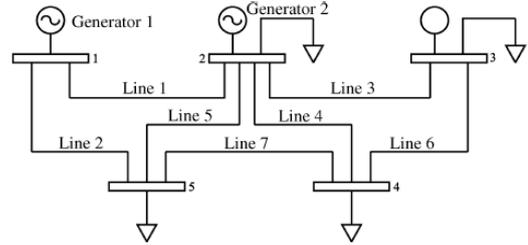


图 3 2 机 5 节点系统

Fig. 3 2-machine 5-node system

### 1) 不同安装位置对发电成本影响

在该系统中七条线路上分别依次安装一台 UPFC, 且 UPFC 安装容量固定为 0.1, 其发电成本变化趋势如图 4 所示。

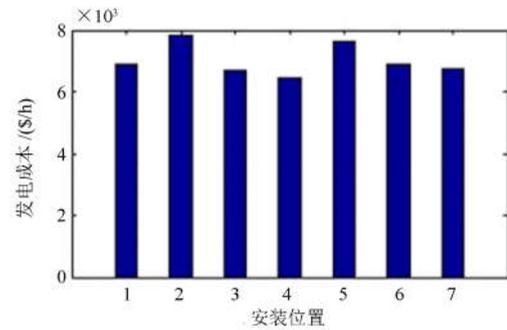


图 4 发电运行成本变化趋势

Fig. 4 Power generation operating cost trends

由图 4 可知, 当 UPFC 台数和容量固定, 采用前文所提出的模型求得的最优解是安装在线路 4 上, 此时由于 UPFC 的引入从而有效地调节了线路间的潮流分布, 系统两台发电机的发电成本达到最低。

当规划在系统中组合安装两台 UPFC, 其容量依旧保持 0.1 不变, 在所有安装情况中选取其中 12 种最可能配置的候选地点, 结果如表 1 所示。由该表可知, 相比不安装 UPFC, 安装 UPFC 后确实能改善系统潮流并节约成本。由于两台发电机成本不同, 相比考虑线路总损耗而言, 优先考虑总发电成本更为合理, 一般来说将 UPFC 安装在重载线路上来防止该线路超载, 同时可允许更多的电力在周围线路进行传送从而达到最高经济利益, 采用本文方法求得最佳安装地点是在线路 4 和线路 5 上, 此时发电成本为 6 246.2(\$/h), 该目标函数在所有配置策略中达到最低, 验证了该选址信息的可行性与准确性。

表 1 系统规划结果

Table 1 System planning result

UPFC 安装位置	$P_{G1}/MW$	$P_{G2}/MW$	发电机成本/(\$/h)
不安装	197.4	75.2	6 532.2
L1+L3	211.3	43.5	6 231.4
L1+L4	205.8	55.6	6 435.8
L2+L4	200.6	70.1	6 455.6
L2+L6	199.5	65.4	6 321.9
L3+L4	202.5	49.6	6 326.8
L3+L6	198.6	73.2	6 510.5
L3+L7	197.2	59.6	6 485.6
L4+L5	198.1	49.8	6 310.5
L4+L6	204.6	55.6	6 378.5
L4+L7	220.6	74.1	6 522.5
L5+L6	224.6	46.8	6 324.6
L6+L7	198.5	65.8	6 348.7

2) 不同安装容量对发电成本影响

为了研究 UPFC 等效容量对目标函数的影响, 将 UPFC 安装地址固定在线路 4 上, 通过改变其控制容量, 分段步长设为 0.01, 容量上限设为 0.15, 观察发电成本的降低情况, 其变化情况见图 5。随着线路上的 UPFC 等效容量递增, 发电成本逐渐降低, 当  $x = 0.08$  时, 目标函数达到最低值, 随后缓慢增大并趋于平稳。不同的 UPFC 容量对于投资和收益是有影响的, 运用本文所提出的方法可以找到 UPFC 最优容量值。

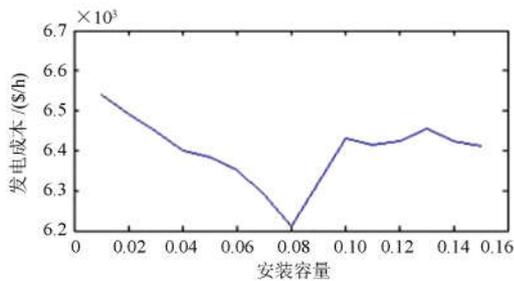


图 5 容量规划结果

Fig. 5 Capacity planning result

对于 IEEE-118 多节点系统, 当限定容量为 0.1, UPFC 台数为 2 台, 对其进行仿真验证, 并在所有配置结果中选取 10 种经济成本较低的规划方案如表 2 所示, 初始情况下, 该系统每小时发电成本是每小时 194 963 美元, 当在(17-31)和(26-30)两处安装 UPFC 后, 此时成本降为 157 946(\$/h)。

在 2 机 5 节点系统、IEEE-14 系统、IEEE-118 系统三种场景进行仿真优化配置, 其计算效果对比

如表 3 所示, 分别在三个系统中对安装位置和台数进行寻优, 随着网络结构的复杂化, 最优安装台数也相应增大, 主要是通过安装在潮流拥堵的线路上来达到更合理的经济成本。此外在 IEEE-118 系统中的仿真计算时间为 32.61 s, 处于一个合理范围内。在只考虑发电机经济成本的情况下, 此策略相比主流的 UPFC 两阶段规划策略更快速。

表 2 UPFC 配置结果

Table 2 UPFC configuration result

安装位置(i-j)	$\Delta\Phi/(\$/h)$	安装位置(i-j)	$\Delta\Phi/(\$/h)$
(17-31)	157 946	(31-37)	168 152
(26-35)		(46-50)	
(17-31)	159 848	(31-37)	168 556
(31-37)		(25-30)	
(26-35)	163 428	(22-25)	174 243
(30-38)		(25-30)	
(26-40)	164 479	(25-30)	175 581
(22-23)		(33-41)	
(20-21)	166 569	(22-25)	178 637
(26-40)		(46-50)	

表 3 仿真系统效率对比

Table 3 Comparison of simulation system efficiency

系统类型	2 机 5 节点	IEEE-14	IEEE-118
最优安装位置(i-j)	(2-4), (2-5)	(3-7), (4-9)(6-8)	(17-31), (30-38), (25-30), (22-25), (31-37), (26-35)
计算时间	0.79 s	2.54 s	32.61 s

5 结论

由于 UPFC 可以调节线路功率传输能力, 改变系统中功率分布从而使系统高效运行。为了实现 UPFC 的优化配置, 本文基于直流潮流模型和 Big-M 法, 提出一种 UPFC 规划研究策略, 对统一潮流控制器在线路中的安装位置和容量进行寻优。采用发电成本最低作为优化的目标函数, 进行仿真验证, 研究结论如下:

1) 基于 UPFC 直流潮流模型, 将混合整数非线性规划问题转化为混合整数线性规划问题, 通过设置适当的优化目标函数, 调用 Matlab 中工具包 YALMIP 来进行求解, 该方法具备在线路中优化配置 UPFC 的能力。

2) UPFC 的接入位置和容量的确对系统运行以及目标函数有重要的影响, 在确定最可能配置的多种方式后, 采用该策略来提高寻优能力从而得到更精准的选址信息。

## 参考文献

- [1] HOU W, GUO L, GONG X. Survivable power efficiency oriented integrated grooming in green networks[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2013, 36(1): 420-428.
- [2] 李生虎, 汪婷, 吴东, 等. 基于初值估算和潮流可控范围的 UPFC 潮流收敛特性研究[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(12): 67-72.
- LI Shenghu, WANG Ting, WU Dong, et al. Research on UPFC power flow convergence characteristics based on initial value estimation and power flow controllable range[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(12): 67-72.
- [3] AN S, GEDRA T W. Estimation of UPFC value using sensitivity analysis[C] // *Proc 2002 Midwest Symp Circuits Systems*, August, 2002, Tulsa, USA.
- [4] 蔡晖, 杨健, 彭竹羿, 等. 基于 PSS/E 的 MMC-UPFC 机电暂态仿真方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(19): 123-131.
- CAI Hui, YANG Jian, PENG Zhuyi, et al. Electromechanical transient simulation method for MMC-UPFC in PSS/E[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(19): 123-131.
- [5] 徐雨田, 刘涤尘, 黄涌, 等. 用于提高输电均衡性的 DPFC 优化配置方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(9): 94-102.
- XU Yutian, LIU Dichen, HUANG Yong, et al. DPFC optimization configuration strategy for increasing transmission equilibrium[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(9): 94-102.
- [6] IYAMBO P K, TZONEVA R. Transient stability analysis of the IEEE 14-bus electric power system[C] // *AFRICON 2007*, September 26-28, 2007, Windhoek, South Africa.
- [7] 韩冰, 张宁宇, 胡昊明, 等. 考虑 UPFC 实时控制策略的电网功率调节能力研究[J]. *电力工程技术*, 2018, 37(1): 1-7.
- HAN Bing, ZHANG Ningyu, HU Minghao, et al. Research on grid power regulation capability considering UPFC real-time control strategy[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2018, 37(1): 1-7.
- [8] 葛雪峰, 魏然, 周科, 等. 基于 UPFC 的配网经济运行技术[J]. *电网技术*, 2018, 42(8): 2585-2594.
- GE Xuefeng, WEI Ran, ZHOU Ke, et al. UPFC-based economic operation of distribution network[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(8): 2585-2594.
- [9] 颜楠楠, 傅正财. 基于多目标粒子群优化算法 UPFC 协调控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(8): 43-48.
- YAN Nannan, FU Zhengcai. Coordinated design of UPFC based on multi-objective particle swarm optimization[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(8): 43-48.
- [10] 赵渊, 杨晓嵩, 谢开贵. UPFC 对电网可靠性的灵敏度分析及优化配置[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(1): 55-60.
- ZHAO Yuan, YANG Xiaosong, XIE Kaigui. Sensitivity analysis and optimization configuration of UPFC for grid reliability[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(1): 55-60.
- [11] 张大波, 朱志鹏, 连帅, 等. 基于多场景变权多目标优化的 UPFC 在风电并网系统中的配置方案研究[J]. *电网技术*, 2019, 43(2): 638-645.
- ZHANG Dabo, ZHU Zhipeng, LIAN Shuai, et al. Allocation scheme research of UPFC based on multiple scenarios with different weighting coefficients and multi-target optimization in wind power integrated system[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(2): 638-645.
- [12] FANG W L, NGAN H W. Optimising location of unified power flow controllers using the method of augmented Lagrange multipliers[J]. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 1999, 146(5): 428-434.
- [13] AN S, CONDREN J, GEDRA T. An ideal transformer UPFC model, OPF first-order sensitivities, and application to screening for optimal UPFC locations[C] // *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, June 24-28, 2007, Tampa, FL, USA.
- [14] 庄海军. UPFC 的选址及网损优化计算[J]. *黑龙江电力*, 2014, 36(6): 491-495, 501.
- ZHUANG Haijun. Location of UPFC and optimization of network loss[J]. *Heilongjiang Electric Power*, 2014, 36(6): 491-495, 501.
- [15] 杨尚瑾. 统一潮流控制器(UPFC)多目标协调控制及稳定控制策略研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2013.
- YANG Shangjin. Research on multi-objective coordination control and stability control strategy of unified power flow controller[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2013.
- [16] 王守相, 刘玉田. 电力系统潮流计算研究现状[J]. *山东电力技术*, 1996(5): 8-12.
- WANG Shouxiang, LIU Yutian. Review of load flow calculation methods in power systems[J]. *Shandong Power Technology*, 1996(5): 8-12.
- [17] 李国庆, 边竞, 王鹤, 等. 直流电网潮流分析与控制研究综述[J]. *高电压技术*, 2017, 43(4): 1067-1078.
- LI Guoqing, BIAN Jing, WANG He, et al. Review on DC

- grids power flow analysis and control[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1067-1078.
- [18] 赵晋泉, 叶君玲, 邓勇. 直流潮流与交流潮流的对比分析[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 147-152.  
ZHAO Jinquan, YE Junling, DENG Yong. Comparative analysis on DC power flow and AC power flow[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 147-152.
- [19] 刘健辰, 刘山林. 基于二阶锥松弛和 Big-M 法的配电网分布式电源优化配置[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2604-2611.  
LIU Jianchen, LIU Shanlin. Optimal distributed generation allocation in distribution network based on second order conic relaxation and Big-M method[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2604-2611.
- [20] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2575-2583.  
LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power coordinated multi-period optimization for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2575-2583.
- [21] MOLZAHN D K, LESIEUTE B C, DEMARCO C L. Approximate representation of ZIP loads in a semidefinite relaxation of the OPF problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1864-1865.
- [22] 李静, 戴文战, 韦巍. 基于混合整数凸规划的含风力发电机组配电网无功补偿优化配置[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 121-129.  
LI Jing, DAI Wenzhan, WEI Wei. A mixed integer convex programming for optimal reactive power compensation in distribution system with wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 121-129.
- [23] DING T, BO R, LI F, et al. Optimal power flow with the consideration of flexible transmission line impedance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1655-1656.
- [24] SARAVANAN M, SLOCHANAL S M R, VENKATESH P, et al. Application of PSO technique for optimal location of FACTS devices considering system loadability and cost of installation[C] // Power Engineering Conference, November 29-December 2, 2005, Singapore, Singapore.

收稿日期: 2019-05-05; 修回日期: 2019-07-11

作者简介:

刘畅(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析; E-mail: liuliuchang@whu.edu.cn

吴军(1977—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行和控制。E-mail: byronwu@whu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)