

DOI: 10.7667/PSPC170527

用于提高输电均衡性的 DPFC 优化配置方法

徐雨田¹, 刘涤尘¹, 黄涌², 赵红生², 徐秋实², 杨健³

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 国网湖北省电力公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077;
3. 国网武汉供电公司, 湖北 武汉 430012)

摘要: 针对如何选择分布式潮流控制器(Distributed Power Flow Controller, DPFC)安装位置的问题, 通过分析 DPFC 的运行原理, 建立了 DPFC 的等效模型。然后以输电断面潮流分布均衡性和 DPFC 装置全寿命周期收益率为目标, 提出了 DPFC 的优化配置模型。利用改进后的粒子群算法求解所提模型, 能得到安装 DPFC 的最佳线路和输电断面潮流均衡度的提升率。通过 IEEE39 节点和某省级电网 500 kV 系统的仿真, 结果证明 DPFC 装置能够重新均衡地分配断面联络线上的潮流, 同样验证了等效模型和优化配置模型的合理性以及改进的粒子群算法的有效性。

关键词: 柔性交流输电系统; DPFC 装置; 输电均衡性; 优化配置; 改进粒子群算法

DPFC optimization configuration strategy for increasing transmission equilibrium

XU Yutian¹, LIU Dichen¹, HUANG Yong², ZHAO Hongsheng², XU Qiushi², YANG Jian³

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. State Grid HBEPC Economic & Technology Research Institute, Wuhan 430077, China; 3. State Grid Wuhan Power Supply Bureau, Wuhan 430012, China)

Abstract: In order to solve the problem of how to choose the installation position of Distributed Power Flow Controller (DPFC), the equivalent model of DPFC is established after analyzing the running principle of distributed power flow controller. Then, the optimal allocation model of DPFC is based on the equilibrium of power flow distribution of transmission section and the life cycle return rate of DPFC. Using the improved particle swarm optimization algorithm to solve the proposed model, the DPFC can be installed on best lines and the increase of the rate of transmission section of the trend can be gotten. The simulation results of the IEEE39 nodes system and the provincial 500 kV system show that the DPFC device can reallocate the power flow on the cross-section connection line, and verify the rationality of the equivalent model and the optimal configuration model and the effectiveness of the improved particle swarm algorithm.

This work is supported by Science and Technology Project Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 52150016000Y).

Key words: flexible AC transmission system; DPFC device; transmission balance; optimal allocation; improved particle swarm optimization

0 引言

如今, 现代电力系统规模逐渐扩大, 结构日益复杂。特别是随着电力市场的改革发展, 电力系统由于不确定因素而承担更多的潜在风险。在没有重新安排发电机或改变网络拓扑的情况下, 灵活的交流输电系统(Flexible Alternative Current Transmission Systems, FACTS)可以通过调节电网参数来优化电力潮流分布。因此, 在系统中安装 FACTS 装置能有效增强功率传输能力, 降低操作风险。作为较有

前景的 FACTS 设备之一, 统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)在解决电力系统潮流控制问题中起着重要的作用。但是 UPFC 装置受限于系统额定功率大、电力电子器件电压等级高、可靠性不高等问题未得到广泛推广。2007 年, 荷兰 Delft 理工大学提出了一种新型的 FACTS 装置——分布式潮流控制器^[1-3], 该装置在实现 UPFC 所有功能的前提下, 改进了 UPFC 装置的结构, 即在串联侧不再使用大容量的变流器, 取而代之的是多个单相变流器, 从而达到降低设备成本、提高设备运行可靠性的目的。

目前, 对于线路潮流均衡度方面的研究, 国内

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(52150016000Y)

外已有一定的进展。文献[4]基于线路负载率方差表征电网潮流的均衡度, 从而分析潮流的分布特性。文献[5-6]结合复杂网络特性, 将熵的概念引入电网均衡性判断之中, 构建了潮流熵的指标用以评估潮流均衡度。文献[7-8]建立了表征线路电流均衡度的指标, 通过节点电流的转换, 引入了负载率均衡度的灵敏度系数, 协调各个节点的注入电流就可以实现均衡线路的负载率。上述文献都是建立均衡度指标对线路潮流分布进行评估, 而未将其作为目标函数纳入输电电网优化配置的过程考虑。

同时针对DPFC装置的研究也取得了一定的成效。文献[9-10]提出模糊逻辑用于DPFC控制器参数的最优选择, 仿真结果表明, 采用模糊逻辑控制器的DPFC可以改善电能质量。文献[11]将串联侧基波电压作为控制变量、线路有功无功作为控制目标, 提出了应用于DPFC装置串联侧基波的控制策略, 基于该控制器可以计算出DPFC控制功率的上下限。文献[12-13]针对分布式FACTS控制器研究了多电平逆变器拓扑结构, 仿真结果显示对于大功率半导体开关, 可以设计一个多电平逆变器用于分布式串联补偿, 从而控制有功潮流。上述文献的研究侧重于对DPFC元件的模型进行数字仿真和控制性能的分析, 而较少涉及元件的规划问题。

综合以上分析, 本文建立了 DPFC 的等效模型, 根据输电线路负载率标准差和全寿命周期收益率指标, 以输电断面线路潮流输送均衡性最大及经济性最优为目标函数搭建了 DPFC 的优化配置模型, 采用改进的粒子群算法对模型进行了求解。通过 IEEE39 节点和某省级电网 500 kV 系统验证了对 DPFC 装置进行优化配置模型的合理性。仿真结果表明, 适当选取 DPFC 装置的安装位置不仅能提升断面潮流传输的均衡性, 而且能够增大联络线的传输裕度, 提高断面输送功率。

1 DPFC 模型的建立

1.1 DPFC 的运行原理

UPFC 包括两个电压源型变流器(Voltage Source Converter, VSC), 通过公共直流电容耦合^[14-15], 从而实现有功功率在变流器的串联输出端子和并联输出端子之间的双向流动。每个变流器可以在其自身的 AC 端子处独立地产生(或吸收)无功功率, 结构如图 1 所示。

与 UPFC 类似, DPFC 同样由并联侧和串联侧两部分组成, 并且 DPFC 的并联侧变流器与 UPFC 的并联侧变流器相同, 只是 DPFC 串联侧的变流器由多个单相变流器构成。各单相变流器均独立运行,

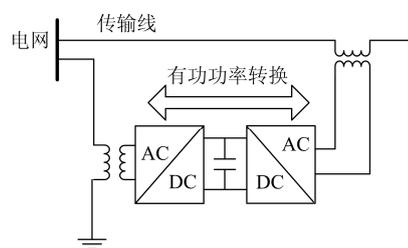


图 1 UPFC 装置的结构

Fig. 1 Structure of UPFC device

并且由自己的直流电容器提供所需的电压。传输线上的三次谐波是并联变流器和串联变流器实现有功功率交换的载体。为给三次谐波提供通道, 安装 DPFC 的传输线两端均应连接 Y-Δ 变压器。具体结构如图 2 所示。

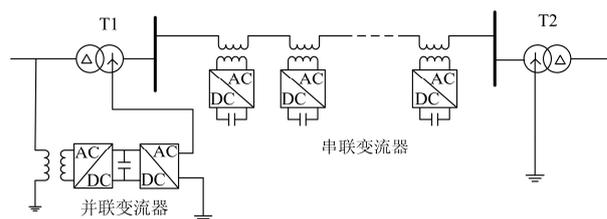


图 2 DPFC 装置的结构

Fig. 2 Structure of DPFC device

DPFC 中的功率交换方法基于非正弦分量的功率理论。根据傅里叶级数, 非正弦电压或电流可以表示为不同频率处正弦分量的和。电压和电流分量的乘积提供有功功率, 因此有功功率方程如式(1)。

$$P = \sum_{i=1}^{\infty} V_i I_i \cos \varphi_i \quad (1)$$

式中: V_i 和 I_i 分别是第 i 次谐波的电压和电流; φ_i 是相同频率下电压和电流之间的角度。公式(1)表示不同频率分量的有功功率之间是相互独立的。基于此, DPFC 中的并联变流器可以吸收一个频率的有功功率并且输出另一频率的功率。

假设 DPFC 被放置在双总线系统的传输线中, 如图 3 所示。当电源产生有功功率时, 在并联侧, 其中的三相变流器吸收系统中的基波有功功率, 通过单相变流器将其转化为三次谐波, 由靠近并联侧一端的 Y-Δ 变压器的中性点重新注入到输电线路中去。在串联侧, 串联侧变流器吸收输电线路中的三次谐波功率来对直流电容充电, 然后将其转换为基频的有功功率输送到线路中, 其余的三次谐波由输电线路另一端的 Y-Δ 变压器的中性点流入大地, 与并联侧变流器的接地点构成三次谐波通道, 从而实现线路潮流的控制。

理论上, 三次、六次和九次谐波都可用来实现 DPFC 中有功功率的交换, 在三相系统中, 每相的三次谐波都相同, 可将其称为“零序”。由于传输线传输功率的能力与其阻抗成反比, 而传输线阻抗与频率成正比。因此, 电力系统中通常选择最低频率的三次谐波用于改变线路的电压水平。

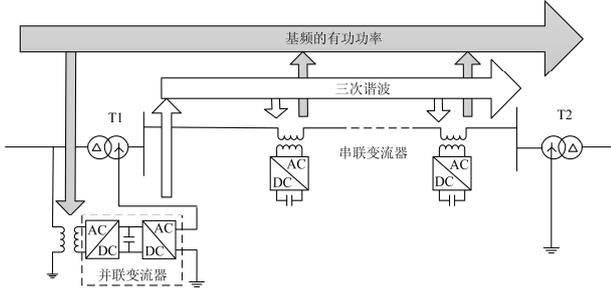


图 3 DPFC 装置的工作原理

Fig. 3 Working principle of DPFC device

与 UPFC 相比, DPFC 装置在串联侧部分变流器发生故障时, 剩余变流器都能正常工作并分担故障变流器所带来的功能缺失, 不会像 UPFC 一样串联侧一旦发生故障整个串联侧都无法正常工作, 装置的可靠性得到了提高。

并且, DPFC 串联侧由 UPFC 单个大容量的变流器分布成多个小容量变流器后, 串联侧可直接悬挂于所安装的导线上, 不需要考虑相间高压绝缘问题, 也减少了很多大功率的电力电子器件, 从而使 DPFC 串联侧成本相对 UPFC 有了极大节约。

1.2 DPFC 的等效模型

在 DPFC 的运行中能够实现三次谐波的传输, 但是三次谐波只作为有功功率交换的载体, 维持 DPFC 内部的串联和并联变流器的功率平衡, 实质上并未产生或消耗有功功率。所以当计算含 DPFC 的输电线路功率时, 无需叠加其他频率功率, 只需关注基波潮流^[16]。DPFC 通过改变串联侧基频电压的幅值和相角来达到调整线路潮流的目的。并联侧变流器的主要作用是稳定 DPFC 装置接入节点处的电压, 同时产生可以在线路上传输的三次谐波, 实现将有功功率输送至串联侧。在 DPFC 的等效模型中, 并联和串联侧的变流器可分别近似为两个理想稳压源, 得到模型如图 4 所示。

从图 4 中, 串联和并联注入支路分别等效于两个理想电压源 $U_{sh} \angle \theta_{sh}$ 和 $U_{se} \angle \theta_{se}$ 。 $R_{sh} + jX_{sh}$ 表示并联变流器的漏电抗, 而 $R_{se} + jX_{se}$ 表示线路阻抗和串联变流器漏电抗之和。

式(2)一式(5)分别表示节点 s 和节点 r 上等效率注入的分量。

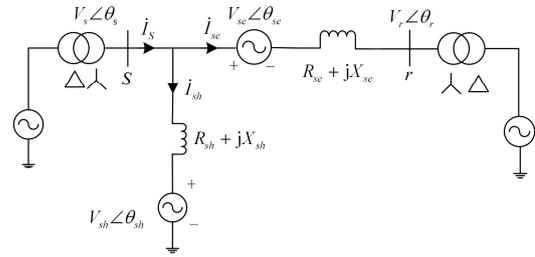


图 4 DPFC 装置的等效模型

Fig. 4 Equivalent model of DPFC device

$$P_{sr} = U_s^2 G_{ss} + U_s U_r (G_{sr} \cos(\theta_s - \theta_r) + U_s U_{se} (G_{se} \cos(\theta_s - \theta_{se}) + B_{se} \sin(\theta_s - \theta_{se})) + B_{sr} \sin(\theta_s - \theta_r)) + U_s U_{sh} (G_{sh} \cos(\theta_s - \theta_{sh}) + B_{sh} \sin(\theta_s - \theta_{sh})) \quad (2)$$

$$Q_{sr} = -U_s^2 B_{ss} + U_s U_r (G_{sr} \sin(\theta_s - \theta_r) + U_s U_{se} (G_{se} \sin(\theta_s - \theta_{se}) - B_{sr} \cos(\theta_s - \theta_r)) - B_{se} \sin(\theta_s - \theta_{se})) + U_s U_{sh} (G_{sh} \sin(\theta_s - \theta_{sh}) - B_{sh} \cos(\theta_s - \theta_{sh})) \quad (3)$$

$$P_{rs} = U_r^2 G_{rr} + U_r U_{se} (G_{rr} \cos(\theta_r - \theta_{se}) + B_{rr} \sin(\theta_r - \theta_{se})) + B_{sr} \sin(\theta_r - \theta_s) + U_r U_s (G_{sr} \cos(\theta_r - \theta_s)) \quad (4)$$

$$Q_{rs} = -U_r^2 B_{rr} + U_r U_{se} (G_{rr} \sin(\theta_r - \theta_{se}) - B_{rr} \sin(\theta_r - \theta_{se})) - B_{sr} \cos(\theta_r - \theta_s) + U_r U_s (G_{sr} \sin(\theta_r - \theta_s)) \quad (5)$$

2 DPFC 优化配置模型

重要的输电线路作为电网的骨干网架, 承担着大部分地域间潮流传输。输电断面上各条线路的传输效率限制着整个断面潮流传输功率^[17-18]。为更好地评估网架负载分布情况, 应对未来的负荷增长, 输电线路的容量通常留有一定裕度^[19-20], 线路的负载率越低, 表明线路的预留容量越大, 传输能力越强。同时经济性也是衡量 DPFC 装置是否配置合理的重要指标。

2.1 目标函数

(1) 潮流均衡性

本文采用负载率标准差指标来衡量线路均衡性, 目标函数如式(6)。

$$f_1 = \min \left(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{l \in \Omega} (\alpha_l - \beta)^2} \right) \quad (6)$$

式中: α_l 为区域间联络线 l 的负载率; β 为区域间所有联络线的平均负载率; Ω 为区域间所有联络线的集合。具体表示如式(7)、式(8)。

$$\alpha_l = P_l / \bar{P}_l \quad (l \in \Omega) \quad (7)$$

$$\beta = \frac{1}{N} \sum_{l \in \Omega} \alpha_l \quad (8)$$

式中: P_l 和 \bar{P}_l 为线路 l 的实际潮流有功及输送容量; N 为集合 Ω 内线路的数量。

(2) 全寿命周期收益率

DPFC 装置的年寿命周期收益率即为投入运行后全寿命周期内获得的年均收入与年均投资费用的比值。如式(9)所示。

$$S = \frac{8760 \cdot c_e \cdot (\sum_{l \in N} P_{D,l} - \sum_{l \in N} P_{O,l})}{F(r, n) \cdot c_D \cdot \sum_{l \in N} G_{D,l}} \quad (l=1, 2, \dots, N) \quad (9)$$

式中: $P_{D,l}$ 为安装 DPFC 装置后断面上某条联络线传输功率达到极限时联络线 l 上的功率; $P_{O,l}$ 为不含 DPFC 装置时断面上某条联络线传输功率达到极限时联络线 l 上传输的功率; $G_{D,l}$ 为断面联络线 l 上安装的 DPFC 装置容量; c_e 为单位电价; c_D 为 DPFC 单位容量造价; $F(r, n)$ 为等年值化系数, 如式(10)。

$$F(r, n) = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (10)$$

目标函数如式(11)所示。

$$f_2 = \min \frac{1}{S} \quad (11)$$

2.2 等式约束

(1) 增加 DPFC 装置后的线路潮流约束

$$\begin{cases} P_s = P_{sr} + U_s \sum_{r=1}^n U_r (G_{sr} \cos \theta_{sr} + B_{sr} \sin \theta_{sr}) \\ Q_s = Q_{sr} + U_s \sum_{r=1}^n U_r (G_{sr} \sin \theta_{sr} - B_{sr} \cos \theta_{sr}) \\ P_r = P_{rs} + U_r \sum_{s=1}^n U_s (G_{sr} \cos \theta_{sr} + B_{sr} \sin \theta_{sr}) \\ Q_r = Q_{rs} + U_r \sum_{s=1}^n U_s (G_{sr} \sin \theta_{sr} - B_{sr} \cos \theta_{sr}) \end{cases} \quad (12)$$

(2) DPFC 装置内功率平衡约束

在忽略 DPFC 装置内部器件的有功功率消耗的前提下^[21-22], 串联电压源向传输线注入的功率与并联电压源从系统吸收的功率保持平衡, 有:

$$P_{sh} + P_{se} = \text{Re}(\dot{U}_{sh} \dot{I}_{sh}^*) + \text{Re}(\dot{U}_{se} \dot{I}_{se}^*) = 0 \quad (13)$$

式中, P_{sh} 和 P_{se} 分别表示并联电压源和串联电压源的输出功率。

(3) DPFC 的目标控制约束

$$\begin{cases} P_{rs} - P_{rs_ref} = 0 \\ Q_{rs} - Q_{rs_ref} = 0 \\ U_s - U_{rs_ref} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: P_{rs_ref} 和 Q_{rs_ref} 分别是线路有功和无功功率的控制目标^[23-24]; U_{rs_ref} 是总线电压的控制目标。

2.3 不等式约束

(1) 发电机功率约束

$$\begin{cases} P_{gi, \min} \leq P_{gi} \leq P_{gi, \max} \\ Q_{gi, \min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi, \max} \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, n_g) \quad (15)$$

式中: P_{gi} 和 Q_{gi} 分别表示发电机 i 的有功、无功出力; $P_{gi, \max}$ 和 $P_{gi, \min}$ 分别表示发电机 i 的有功上、下限; $Q_{gi, \max}$ 和 $Q_{gi, \min}$ 分别表示发电机 i 的无功上、下限; n_g 表示系统中发电机的数量。

(2) 节点电压约束

$$\begin{cases} U_{j, \min} \leq U_j \leq U_{j, \max} \\ \theta_{j, \min} \leq \theta_j \leq \theta_{j, \max} \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

式中: n 表示系统中节点的数量; $U_{i, \max}$ 和 $U_{i, \min}$ 分别表示节点 j 电压幅值上、下限; $\theta_{j, \max}$ 和 $\theta_{j, \min}$ 分别表示节点 j 电压相位上、下限。

(3) DPFC 安装传输线的功率约束

$$\begin{cases} P_{l, \min} \leq P_l \leq P_{l, \max} \\ Q_{l, \min} \leq Q_l \leq Q_{l, \max} \end{cases} \quad (l \in \Omega) \quad (17)$$

式中: $P_{l, \max}$ 和 $P_{l, \min}$ 分别表示线路 l 传输有功的上、下限; $Q_{l, \max}$ 和 $Q_{l, \min}$ 分别表示线路 l 传输无功的上、下限。

3 模型求解算法

目前对优化问题的求解多采用启发式算法, 其中粒子群算法具有收敛速度快、参数可调等优点, 普遍适用于各类优化问题的求解。但传统的粒子群算法存在过早收敛和区域搜索能力随迭代次数增加而降低的问题。为提高粒子群算法的准确性, 本节采用文献[25]提出的提高局部搜索能力的方法对粒子群算法作出改进。

3.1 改进的粒子群优化算法

粒子群算法中优化目标的每个潜在解都称为粒子, 所有潜在解构成了粒子群。本文研究的 DPFC 优化配置模型中的待优化变量为发电机的输出有功 P_g 和无功功率 Q_g 、母线电压相位角 θ 和幅值 U 、DPFC 串联支路的电压 U_s 、DPFC 安装线路的有功 P_{rs} 和无功功率 Q_{rs} 、DPFC 安装的线路 n_p 。一个优化目标函数的解, 即为一个粒子, 其位置及速度分别如式(18)、式(19)所示。

$$P_i = [P_{i,1} \quad P_{i,2} \quad P_{i,3} \cdots P_{i,D}] \quad (18)$$

$$V_i = [V_{i,1} \quad V_{i,2} \quad V_{i,3} \cdots V_{i,D}] \quad (19)$$

为得到最终的全局最优可行粒子, 就要保证在

每一次迭代中,所有可行粒子的目标函数值都比不可行粒子的目标函数值优秀。为实现这一目标,本文对 DPFC 优化配置目标函数进行修改,第 k 次迭代的目标函数如式(20)所示。

$$\min f' = \min f + \text{Punish}(P) \quad (20)$$

其中 $\text{Punish}(P)$ 函数对不可行粒子不满足相应约束条件做出的惩罚,确保其目标函数值比所有可行粒子的历史最大目标函数值还要大。

在添加可靠约束机制的基础上,本文按照文献[26]所提出的方法对粒子更新公式进行修改。在迭代的中后期当粒子具有局部收敛倾向时,为提高粒子的搜索能力,粒子的位置更新公式修改为式(21)。

$$P_{i,d}^k = \{B_d^{k-1}\} + RW_{\text{neigh}} \quad (21)$$

在迭代的中后期,当粒子不具有局部收敛倾向时,为避免粒子随迭代周期增加而造成速度降低,粒子的速度更新公式修改为式(22)。

$$V_{i,d}^k = \{\omega^k(V_{i,d}^{k-1}) + qR(P_{i,t}^{k-1}) + c_2^k \gamma_2[(B_d^{k-1}) - (P_{i,t}^{k-1})] + c_1^k \gamma_1[(B_{i,d}^{k-1}) - (P_{i,d}^{k-1})]\} \quad (22)$$

3.2 模型求解流程

采用改进的粒子群优化算法求解 DPFC 优化配置模型的详细流程如图 5 所示。其中, k 为迭代次数。

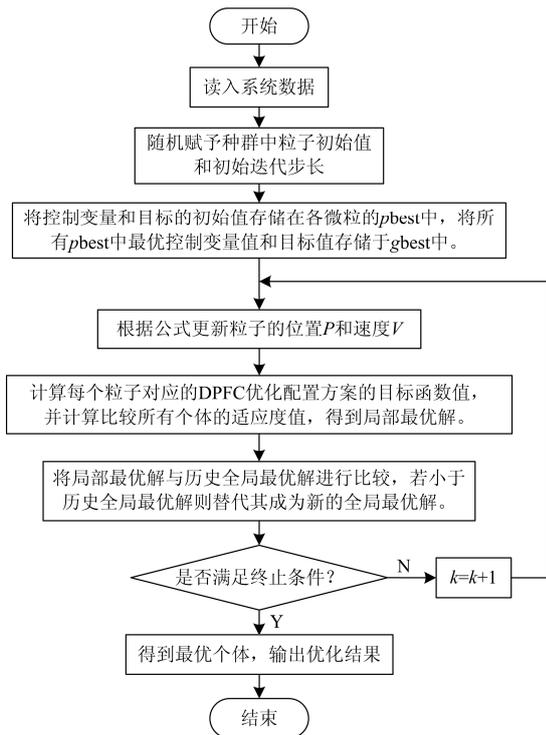


图 5 求解 DPFC 优化配置模型流程图

Fig. 5 Flow chart of solving DPFC optimization configuration model

4 算例及结果分析

基于本文提出的 DPFC 优化配置模型,通过 IEEE39 节点系统和某省级电网 500 kV 系统进行了仿真,下面对仿真结果进行分析。

4.1 IEEE39 节点的算例分析

根据文献[27],采用如图 6 所示的 IEEE39 节点仿真系统。该系统有 10 个发电机,19 个负荷节点,36 条传输线和 12 个变压器,可划分为三个区域。在基础情况下,区域 1 中的发电量为 2 230 MW,负载为 2 380 MW。区域 2 中发电量为 790 MW,负载为 1 120 MW。区域 3 中发电量为 3 180 MW,负载为 2 650 MW。选定研究输电区域为区域 3,受电区域为区域 1,两者之间的输电断面由传输线 16-17、28-26、29-26 构成。

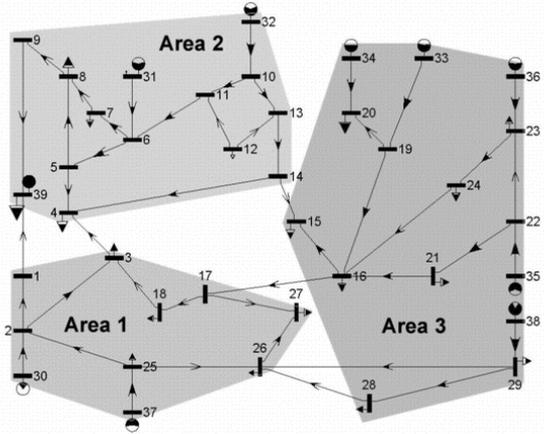


图 6 IEEE39 节点系统

Fig. 6 IEEE39 nodes system

在不安装 DPFC 装置时,输电断面的初始潮流如表 1 所示。

表 1 区域 3-区域 1 断面初始潮流分布

Table 1 Area 3 - Area 1 section initial flow distribution

输电通道	输送潮流/MW	线路热稳/MW	载荷率/%	断面总潮流/MW	负载率标准差
16-17	224	600	37.33	555	0.0570
28-26	141	600	23.50		
29-26	190	600	31.67		

将区域 3-区域 1 断面上的 3 条输电线路作为候选安装线路,每条安装线路上拟安装 DPFC 装置容量为 15 MW。通过 DPFC 优化配置模型计算得到 DPFC 的安装数量为 1 条,安装位置为线路 16-17,安装 DPFC 之后线路传输均衡性为 0.010 9。

在 PSASP 软件中,通过在输电线路 16-17、28-26、29-26 逐条安装 DPFC 等效装置来验证所提

对比分析表 5 和表 6 中的数据可知,斗笠—孝感线路输送潮流功率较初始潮流由 1 623 MW 减少至 1 250 MW,斗笠—仙女山线路输送潮流较初始潮流由 1 411 MW 减少至 1 250 MW,其余三条线路载荷率均有不同程度的提高,其中双河—玉贤线路输送潮流增幅最大为 291 MW。断面上输送总潮流与初始潮流相比基本不变。

在斗笠—孝感和斗笠—仙女山安装 DPFC 装置后,断面负载率标准差为 0.016 0。与本文所提优化配置模型的计算结果保持一致。此时,斗笠—孝感线路和斗笠—仙女山线路上的载荷率分别由接近最大负载率的 74.28%和 64.58%降低至 57.21%,载荷率分别下降 17.07%和 7.37%。说明这两条线路均还有潮流输送的裕度,在发电机出力和负荷继续增大的情况下,能继续承担一定的功率传输。由此,DPFC 装置不仅可以改善线路潮流分布均衡,还能提高断面潮流的输送能力。

4.3 算法收敛性分析

在给出同样的精度要求下,以 IEEE39 节点系统为例对本文所提的改进的粒子群算法的收敛性进行分析,如图 8 所示。

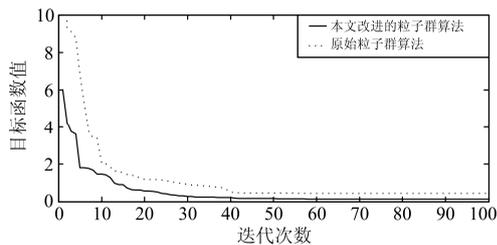


图 8 算法收敛性示意图

Fig. 8 Curve of algorithm convergence

在根据本文提出的式(15)、式(16)以及式(18)和式(19)对粒子群算法进行修改后,算法寻找最优解的效率和得到的最优解的值都有了明显的改善,算法收敛速度加快、最优解质量提高。由此充分说明了本文提出的改进的粒子群算法的优越性。

5 结论

在电力系统传输容量和负荷需求不断增大,对系统潮流控制要求越来越高的情况下,本文分析了 DPFC 装置控制线路潮流分布的运行原理,建立了以输送断面联络线上潮流分布均衡度和全寿命周期收益率最高为目标函数的 DPFC 优化配置模型,采用改进的粒子群优化算法对其进行求解。通过 IEEE39 节点和某省级电网 500 kV 系统验证所提模型的合理性和算法的有效性,得到如下结论:

(1) 在电网潮流传输不均衡的输电断面上安装 DPFC 装置能显著均衡断面上联络线的潮流分布,改善个别线路持续重载而其他线路轻载甚至空载的现象。

(2) 在合适线路上安装 DPFC 装置能增大联络线传输功率裕度,提高潮流输送能力,从而减少通过增加输电通道来增加输电能力的投资,具有较好的经济性和应用前景。

综上所述,本文的研究对电网中 DPFC 的安装选址做出新的探索,有利于未来 DPFC 在实际电网进一步的推广。

参考文献

[1] YUAN Z H, DE HAAN S W H, FERREIRA B. A new FACTS component: distributed power flow controller (DPFC)[C] // 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, September 2-5, 2007, Aalborg, Denmark: 1-4.

[2] YUAN Z H, DE HAAN S W H, FERREIRA B. Control scheme to improve DPFC performance during series converter failures[C] // Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Providence, USA: 1-6.

[3] YUAN Z H, DE HAAN S W H, FERREIRA B. Construction and first result of a scaled transmission system with the Distributed Power Flow Controller (DPFC)[C] // 13th European Conference on Power Electronics and Applications, September 8-10, 2009, Barcelona, Spain: 1-10.

[4] 刘文颖, 但扬清, 朱艳伟, 等. 复杂电网自组织临界态辨识物理指标研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 274-280, 288.

LIU Wenying, DAN Yangqing, ZHU Yanwei, et al. Research on physical indicators to identify power system self-organized critical state[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 274-280, 288.

[5] 刘文颖, 蔡万通, 张宁, 等. 基于联合加权熵的电网自组织临界状态演化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1363-1370.

LIU Wenying, CAI Wantong, ZHANG Ning, et al. Evolution of self-organizing of grid critical state based on united weighted entropy theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1363-1370.

[6] 竺炜, 李娟, 蒋银华, 等. 发输电经济及电网安全的综合优化建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4335-4344.

- ZHU Wei, LI Juan, JIANG Yinhua, et al. Integrated optimization model for generation transmission economic and grid security[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4335-4344.
- [7] 岳贤龙, 王涛, 顾雪平, 等. 基于灵敏度和潮流熵的线路过负荷控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 58-66.
- YUE Xianlong, WANG Tao, GU Xueping, et al. Control strategy for line overload based on sensitivity and power flow entropy[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 58-66.
- [8] 黄帅, 龙燕, 赵宏伟, 等. 重要区域孤岛微电网抗毁性规划初探[J]. 电工技术学报, 2016, 31(5): 77-84.
- HUANG Shuai, LONG Yan, ZHAO Hongwei, et al. Preliminary study on stand-alone microgrid invulnerability planning in important areas[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(5): 77-84.
- [9] KRISHA B V, PRASHANTH B V, ANANEYULU K S R. Designing of multilevel DPFC to improve power quality[C] // International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), March 3-5, 2016, Chennai, India: 4129-4133.
- [10] AKULA N V V, RAJASEKHAR M, NAVEEN B. Harmonics reduction and power quality improvement by using DPFC[C] // International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), March 3-5, 2016, Chennai, India: 1754-1758.
- [11] AHMAD J S, MASOUD B, MOHAMMAD M G. Power quality improvement and mitigation case study using distributed power flow controller[C] // 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), May 28-31, 2012, Hangzhou, China: 464-468.
- [12] DIVYA S, SHYAMALA U. Power quality improvement in transmission systems using DPFC[C] // IEEE Sponsored 2nd International Conference Electronics and Communication System (ICECS 2015), February 26-27, 2015, Coimbatore, India: 854-858.
- [13] SANDEEP R. GAIGOMAL B, RENGE M M. Some studies of distributed series FACTS controller to control active power flow through transmission line[C] // 2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC), February 6-8, 2013, Sri Rangalatchum Dindigul, India: 124-128.
- [14] SHU-JUN Y, YAN S X, YAN W, et al. Research on dynamic characteristics of unified power flow controller (UPFC)[C] // Proceedings of 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), July 6-9, 2011, Weihai, China: 490-493.
- [15] 王海潜, 祁万春, 乔黎伟, 等. UPFC 三节点功率注入模型及其工程应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 145-151.
- WANG Haiqian, QI Wanchun, QIAO Liwei, et al. A three-bus power injection model of UPFC and its engineering application[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 145-151.
- [16] YUAN Z H, DE HAAN S W H, FERREIRA B. A FACTS device: distributed power-flow controller (DPFC)[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2010, 25(10): 2564-2572.
- [17] 张立志, 赵冬梅. 考虑 FACTS 配置的电网输电能力计算[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 26-31.
- ZHANG Lizhi, ZHAO Dongmei. Calculation of power network available transfer capability considering optimal mounted positions of FACTS devices[J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 26-31.
- [18] 张健, 冀瑞芳, 李国庆. TCSC 优化配置提高可用输电能力的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 23-28.
- ZHANG Jian, JI Ruifang, LI Guoqing. Study of enhancement of available transfer capability using TCSC optimal allocation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 23-28.
- [19] 李国庆, 宋莉, 李筱婧. 计及 FACTS 装置的可用输电能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 36-42.
- LI Guoqing, SONG Li, LI Xiaojing. Available transfer capability calculation considering FACTS controllers[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 36-42.
- [20] 何培颖, 房鑫炎. 基于聚类算法的关键输电断面快速搜索[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 97-101.
- HE Peiyang, FANG Xinyan. Fast search of the key transmission sections based on clustering algorithms[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 97-101.
- [21] 袁玮. 分布式潮流控制器的控制特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- YUAN Wei. Research on the control characteristics of distributed power flow controller[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [22] 卢俊. 分布式潮流控制器的可靠性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- LU Jun. Reliability study on distributed power flow

- controller[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [23] 唐爱红, 卢俊, 宣俭, 等. 分布式潮流控制器对系统功率控制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 15-20, 16.
TANG Aihong, LU Jun, XUAN Jian, et al. Study of the power control ability of the distributed power flow controller[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 15-20, 16.
- [24] 张晓成. 基于多目标控制的分布式潮流控制器研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
ZHANG Xiaocheng. Research on multi-objective control of DPFC[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [25] LI Yanliang, SHAO Wei, YOU Long, et al. An improved PSO algorithm and its application to UWB antenna design[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013, 12: 1236-1239.
- [26] 吴辰斌, 李海明, 刘栋, 等. 一种改进型粒子群优化算法在电力系统经济负荷分配中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 44-48.
WU Chenbin, LI Haiming, LIU Dong, et al. Application of improved particle swarm optimization algorithm to power system economic load dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 44-48.
- [27] <http://www.pserc.cornell.edu/tcc/tcc.md>
- [28] 范黎, 隗震, 娄素华, 等. 配电项目最大供电能力及增供电量效益的评估[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊1): 84-91.
Fan Li, Wei Zhen, Lou Suhua, et al. The evaluation for maximum power supply capability and benefit of increasing power supply of distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 84-91.
- [29] 胡健, 付立军, 马凡, 等. 基于仿射算术优化的不确定系统区间潮流快速分解法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23): 125-131.
HU Jian, FU Lijun, MA Fan, et al. Fast decoupled power flow calculation of uncertainty system based on interval affine arithmetic optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(23): 125-131.

收稿日期: 2017-04-12; 修回日期: 2017-12-01

作者简介:

徐雨田(1993—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析; E-mail: jirang_song@163.com

刘涤尘(1953—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: dcliu@whu.edu.cn

(编辑 姜新丽)