

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2020.01.011

计及 UPFC 的电力系统多阶段多目标无功优化算法

孙蓉, 朱梓荣, 卫志农, 孙国强, 廖星星

(河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098)

摘要:统一潮流控制器(UPFC)并联侧连续的无功调节能力为电力系统无功优化提供了新的控制手段。基于此,首先建立适用于新型 UPFC 拓扑的 UPFC 稳态模型;然后考虑无功设备动作次数的约束,明确多目标无功优化问题的目标函数和约束条件,建立计及 UPFC 的多目标无功优化模型;接着,提出一种多阶段方法对其进行求解,其中,第一阶段将原问题进行松弛并采取归一化的方法统一多个目标的量纲,第二阶段基于规格化平面约束法获取松弛问题的 Pareto 最优候选解集,并给出折衷解的选取方法,第三阶段基于三角罚函数法对折衷解中的整数变量进行归整,获取原问题的最优折衷整数解。最后,对南京西环网实际等值系统进行算例测试,验证了算法的有效性及 UPFC 在无功优化问题中的应用前景。

关键词:统一潮流控制器;多目标无功优化;多阶段优化方法;规格化平面约束法;三角罚函数法

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2020)01-0076-10

0 引言

统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)在控制线路潮流的同时也可以对母线电压进行调节^[1-2],其连续的调节能力为电网提供了一种灵活、快速的无功调节手段。为此,文中就计及 UPFC 的无功优化问题展开研究。

无功优化问题可分为多目标无功优化和单目标无功优化。多目标无功优化可以获取兼顾安全性和经济性的调度策略,相较于单目标无功优化具有更高的应用价值。但无功优化本身就是一个混合整数非线性规划问题^[3],直接对其进行求解具有较大的难度,而多目标无功优化更是无法避免地需要求解多个子问题^[4]。另一方面,为降低多目标无功优化问题的复杂程度,往往会忽略无功设备动作次数的约束^[5]。因此,多目标无功优化主要需要解决以下几个问题:(1)如何在模型中加入无功设备动作次数的约束;(2)如何处理模型中的整数变量;(3)如何获取较为均匀的 Pareto 最优解集。对于问题(1),目前最常用的方法是对一天的负荷按无功设备允许动作次数上限进行分段处理,但该方法无法做到时段间的完全解耦^[6]。解决问题(2)的主要方法有分支定界法^[7]、智能类算法^[8]以及罚函数类算法^[9]。前二者的求解效率难以满足电网实时计算的需求,而罚函数类算法得益于其连续的数学模型,具有较高的计算效率,但如何选取合适的罚函

数,并给出惩罚因子的选取方法仍是无功优化所需解决的问题之一。而对于问题(3),获取 Pareto 解集的方法主要可以分为矢量法^[10]和标量法^[11],由于矢量法本质上仍是基于随机搜索的思想^[12],计算耗时较长,难以应用于实际电网。而标量法则将多目标优化问题转化成一系列单目标优化问题进行求解,具有较高计算效率。其中规格化平面约束(normalized normal constraint, NNC)法^[13]无论是在 Pareto 解集的均匀程度还是避免局部 Pareto 解方面均有较好的求解性能。因此,如何弥补现有方法的缺陷,并将各方法的优点进行有机融合,是求解多目标无功优化问题的重点及难点。

为此,文中首先将无功设备动作次数的约束还原成经济性考量对有功网损的目标进行修正,并提出一种松弛模型对其中的绝对值符号进行等价代换,从而建立同时考虑经济性和安全性的计及 UPFC 的多目标无功优化模型。然后基于 NNC 法和三角罚函数法提出一种只含连续模型的多阶段求解算法。最后基于南京西环网实际等值系统进行算例测试,验证了多阶段算法的有效性和 UPFC 在无功优化领域的应用前景。

1 计及 UPFC 的多目标无功优化模型

1.1 UPFC 的稳态模型

新型 UPFC 拓扑与典型 UPFC 拓扑的区别在于两者的并联变压器的安装位置不同。新型 UPFC 拓扑的结构示意^[14]如图 1(a)所示。将串、并联侧分别等效成一个电压源,其等效电路图可表示如图 1(b)所示。进一步地,将 UPFC 的作用等效为对相

收稿日期:2019-07-11;修回日期:2019-08-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1966205);国家电网有限公司总部科技项目“新能源主动支撑电网工程实用化控制技术及并网适应性研究和应用”(52010118000N)

关节点的功率注入,其多端注入功率模型可表示如图 1(c)所示。

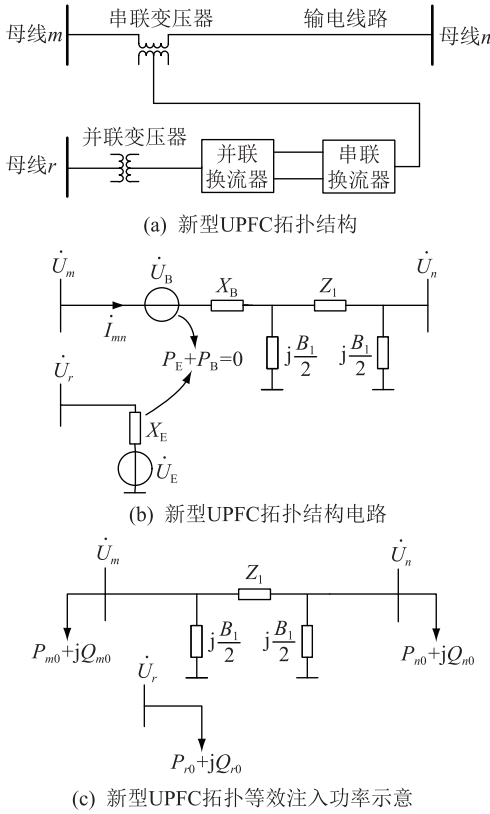


图 1 新型 UPFC 拓扑及其稳态模型示意
Fig.1 Diagram of new UPFC topology and its steady model

图中, \dot{U}_m , \dot{U}_n , \dot{U}_r 分别为 UPFC 串联侧首端节点 m 、末端节点 n 和并联侧节点 r 的电压相量; \dot{U}_E , \dot{U}_B 分别为 UPFC 并联侧和串联侧电压源的等效电压相量; \dot{I}_{mn} 为节点 m 流向节点 n 的电流相量; Z_1 , B_1 分别为 UPFC 串联侧所在线路的阻抗和对地导纳; X_B , X_E 分别为 UPFC 串联侧和并联侧的等效电抗; P_E , P_B 分别为系统注入并联侧和串联侧的有功功率; P_{m0} , P_{n0} , P_{r0} 分别为 UPFC 对节点 m 、 n 和 r 的等效注入有功功率; Q_{m0} , Q_{n0} , Q_{r0} 分别为 UPFC 对节点 m 、 n 和 r 的等效注入无功功率。

若令 $\dot{U}_B^* = \dot{U}_B - j\dot{I}_{mn}X_B$, 由图 1(b) 可以推导出 UPFC 对相关节点的注入功率为:

$$\begin{cases} P_{m0} = U_m U_B^* [g_{mn} \cos \theta_{mB^*} + (B_1/2 + b_1) \sin \theta_{mB^*}] \\ Q_{m0} = U_m U_B^* [g_{mn} \sin \theta_{mB^*} - (B_1/2 + b_1) \cos \theta_{mB^*}] \\ P_{n0} = -U_n U_B^* (g_{mn} \cos \theta_{nB^*} + b_1 \sin \theta_{nB^*}) \\ Q_{n0} = -U_n U_B^* (g_{mn} \sin \theta_{nB^*} - b_1 \cos \theta_{nB^*}) \\ P_{r0} = U_r U_E \sin \theta_{rE} / X_E \\ Q_{r0} = -U_r U_E \cos \theta_{rE} / X_E \end{cases} \quad (1)$$

同时,若忽略 UPFC 内部损耗的影响,系统流入 UPFC 并联侧的有功功率应等于 UPFC 串联侧流入系统的有功功率,因此,在进行相关计算时,UPFC 还需满足以下等式:

$$U_r U_E \sin \theta_{rE} / X_E + U_B^2 g_{mn} - U_m U_B^* [g_{mn} \cos \theta_{mB^*} + (B_1/2 + b_1) \sin \theta_{mB^*}] + U_n U_B^* (g_{mn} \cos \theta_{nB^*} + b_1 \sin \theta_{nB^*}) = 0 \quad (2)$$

式(1)和式(2)构成了新型 UPFC 稳态模型所需满足的基本约束条件。

1.2 多目标无功优化的目标函数

为获取兼顾经济性和安全性的调度策略,文中选取式(3)代表经济性的系统有功网损最小和式(4)代表安全性的系统电压偏差最小作为多目标无功优化问题的目标函数。

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^{n_g} P_{Gi} - \sum_{i=1}^{n_b} P_{Di} \quad (3)$$

$$\min f_2 = \sum_{i=1}^{n_b} (U_i - U_{i-ref})^2 \quad (4)$$

式中: P_{Gi} 为第 i 台发电机的有功出力; P_{Di} 为第 i 个节点的有功负荷; n_g 为发电机数目; n_b 为节点数目; U_i 为第 i 个节点的电压幅值; U_{i-ref} 为第 i 个节点的电压参考值。

在模型中引入无功设备动作次数的约束,一定程度上会导致模型时段间耦合,极大地增加问题的求解难度。为此,文中采用文献[15]所提方法将 f_1 转换为:

$$\min f_3 = \sum_{i=1}^{n_g} P_{Gi} - \sum_{i=1}^{n_b} P_{Di} + c'_u |\Delta u| \quad (5)$$

式中: c'_u 为无功设备的等效调整代价,取 80 kW/次; Δu 为无功设备的调整次数。

由于变压器档位的增减及无功补偿设备的投退都被考量成设备动作,因此对变化量需增加绝对值符号以表征设备的调整次数。但绝对值的引入极大地增加了模型的求解难度,甚至可能出现不收敛的情况。为此,文中引入非负中间变量 Δu_1 和 Δu_2 对 $|\Delta u|$ 进行等价代换,从而消去目标函数中的绝对值符号,代换后的目标函数可写为:

$$\min f_4 = \sum_{i=1}^{n_g} P_{Gi} - \sum_{i=1}^{n_b} P_{Di} + c'_u (\Delta u_1 + \Delta u_2) \quad (6)$$

为了保证 $\Delta u_1 + \Delta u_2$ 能还原 $|\Delta u|$ 的值,在模型中引入以下约束:

$$\begin{cases} \Delta u_1 - \Delta u_2 = u_1 - u_0 \\ \Delta u_1 \Delta u_2 = 0 \\ \Delta u_1 \geq 0 \quad \Delta u_2 \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

由于式(7)中含有平衡约束 $\Delta u_1 \Delta u_2 = 0$, 一定程度上给模型的求解带来挑战, 为此, 文中将该约束进行松弛, 将其转换为 $\Delta u_1 \Delta u_2 \leq K$, 其中 K 为一个极小数, 文中取其值为 10^{-6} (附录 A1 给出该值合理性的证明)。

综上, 选用式(4)和式(6)作为多目标无功优化模型的目标函数, 以获取兼顾安全性和经济性的折衷运行点。

1.3 多目标无功优化的约束条件

由于无功优化问题中需对变压器的档位进行调整, 在优化过程中会改变系统的参数, 因此, 文中以线路功率的形式对节点功率平衡约束进行描述。假设第 l 条支路的首端节点为 p , 末端节点为 q , 该支路首端的有功功率和无功功率分别为 P_{lp} 和 Q_{lp} , 末端的有功功率和无功功率分别为 P_{lq} 和 Q_{lq} , 则有:

$$\begin{cases} P_{lp} = f_1(U_p, U_q, \theta_p, \theta_q, T_l) \\ Q_{lp} = f_2(U_p, U_q, \theta_p, \theta_q, T_l) \\ P_{lq} = f_3(U_p, U_q, \theta_p, \theta_q, T_l) \\ Q_{lq} = f_4(U_p, U_q, \theta_p, \theta_q, T_l) \end{cases} \quad (8)$$

可以看出, 第 l 条支路上的相关功率流均为关于首端电压幅值 U_p 、首端电压相角 θ_p 、末端电压幅值 U_q 、末端电压相角 θ_q 和该支路上的变压器档位 T_l 的函数(表达式详见文献[16])。此时, UPFC 串联侧所在的第 L 条支路的线路功率可写为:

$$\begin{cases} P_{Lm} = f_1(U_m, U_n, \theta_m, \theta_n, T_L) + P_{m0} \\ Q_{Lm} = f_2(U_m, U_n, \theta_m, \theta_n, T_L) + Q_{m0} \\ P_{Ln} = f_3(U_m, U_n, \theta_m, \theta_n, T_L) + P_{n0} \\ Q_{Ln} = f_4(U_m, U_n, \theta_m, \theta_n, T_L) + Q_{n0} \end{cases} \quad (9)$$

因此, 以线路功率表述的传统节点 i 的功率平衡约束为:

$$\begin{cases} \sum_{k \in i} P_{Gk} - \sum_{p=i} P_{lp} - \sum_{q=i} P_{lq} - P_{Di} = 0 \\ \sum_{k \in i} Q_{Gk} - \sum_{p=i} Q_{lp} - \sum_{q=i} Q_{lq} - Q_{Di} + n_{Ci} \Delta C_i = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $k \in i$ 为第 k 台发电机接于节点 i ; $p=i$ 表示所有首端节点为 i 的支路; $q=i$ 表示所有末端节点为 i 的支路; n_{Ci} 为节点 i 上投入的电容/抗器组数, 当节点 i 上无电容/抗器时, 其值恒为零; ΔC_i 为节点 i 上电容/抗器的单位容量。

UPFC 并联侧所在节点 r 的功率平衡约束为:

$$\begin{cases} \sum_{k \in r} P_{Gk} - \sum_{p=r} P_{lp} - \sum_{q=r} P_{lq} - P_{Dr} - P_{r0} = 0 \\ \sum_{k \in r} Q_{Gk} - \sum_{p=r} Q_{lp} - \sum_{q=r} Q_{lq} - Q_{Dr} + \\ n_{Cr} \Delta C_r - Q_{r0} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

除上述节点功率平衡约束外, 无功优化问题还需满足系统运行的容量及安全约束:

$$\begin{cases} \underline{P}_{Gk} \leq P_{Gk} \leq \bar{P}_{Gk} \\ \underline{Q}_{Gk} \leq Q_{Gk} \leq \bar{Q}_{Gk} \\ \underline{S}_U \leq S_U \leq \bar{S}_U \\ \underline{U}_i \leq U_i \leq \bar{U}_i \\ \underline{U}_E \leq U_E \leq \bar{U}_E \\ \underline{U}_B \leq U_B \leq \bar{U}_B \\ \underline{P}_l \leq P_l \leq \bar{P}_l \\ \underline{T}_l \leq T_l \leq \bar{T}_l \\ \underline{n}_{Ci} \leq n_{Ci} \leq \bar{n}_{Ci} \end{cases} \quad (12)$$

式中: S_U 为 UPFC 上流过的功率; P_l 为线路 l 上的有功功率; 上划线“ $\bar{\quad}$ ”和下划线“ $\underline{\quad}$ ”分别表示相应变量的上限值和下限值。

至此, 以式(4)和式(6)为目标函数, 式(7)一式(12)为约束条件的多目标无功优化模型就已表述完全。

2 多目标无功优化的多阶段求解算法

为方便对多阶段求解算法进行描述, 将第 1 节所述计及 UPFC 的多目标无功优化模型写成以下形式:

$$\begin{aligned} & \min \{F_1(x, y), F_2(x, y)\} \\ & \text{s.t.} \begin{cases} h(x, y) = 0 \\ \underline{g} \leq g(x, y) \leq \bar{g} \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: x, y 分别为模型中的连续变量和整数变量。

2.1 多阶段算法的第一阶段

文中所提多阶段算法中第一阶段优化的目的是对 2 个目标进行归一化处理, 从而统一两者的量纲。因此, 在第一阶段优化的过程中, 暂不考虑变量的离散性, 将其中的整数变量松弛为连续变量, 并分别以式(3)和式(6)作为目标函数进行单目标无功优化。

若令松弛模型中的所有变量组成的集合为 x' , 则 2 个单目标优化模型可表示如式(14)和式(15)所示。

$$\begin{aligned} & \min F_1(x') \\ & \text{s.t.} \begin{cases} h(x') = 0 \\ \underline{g} \leq g(x') \leq \bar{g} \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \min F_2(x') \\ \text{s.t.} & \begin{cases} h(x') = 0 \\ \underline{g} \leq g(x') \leq \bar{g} \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

假设对式(15)所示模型进行求解得到目标1的最小值为 $F_1(x'_1)$,令此时目标2的值为 $F_2(x'_1)$,并假设对式(16)所示模型进行求解得到目标2的最小值为 $F_2(x'_2)$,令此时目标1的值为 $F_1(x'_2)$ 。此时,可对2个目标函数按式(16)进行归一化处理,转化后的 $\tilde{F}_1(x')$ 和 $\tilde{F}_2(x')$ 的取值范围均变成 $[0,1]$,从而实现了2个目标函数数量纲的统一。

$$\begin{cases} \tilde{F}_1(x') = \frac{F_1(x') - F_1(x'_1)}{F_1(x'_2) - F_1(x'_1)} \\ \tilde{F}_2(x') = \frac{F_2(x') - F_2(x'_2)}{F_2(x'_1) - F_2(x'_2)} \end{cases} \quad (16)$$

统一量纲后的多目标松弛模型可写为:

$$\begin{aligned} & \min \{\tilde{F}_1(x'), \tilde{F}_2(x')\} \\ \text{s.t.} & \begin{cases} h(x') = 0 \\ \underline{g} \leq g(x') \leq \bar{g} \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

至此,多阶段优化算法中第1阶段对多目标优化问题目标函数的归一化处理就已表述完全。

2.2 多阶段算法的第二阶段

文中所提多阶段算法的第二阶段优化的目的是对归一化处理后的松弛多目标问题进行求解,获取松弛问题的 Pareto 最优解集,并根据运行需求得到松弛问题的最优折衷解。文中采用 NNC 法对松弛多目标问题进行求解,其主要思路是将乌托邦线平均分割为 N 个小段,然后通过每个分割点作乌托邦线的法线,法线与 Pareto 前沿的交点构成的集合即为 Pareto 最优解集,其求解原理如图2所示, μ_1 和 μ_2 分别为乌托邦线的2个端点。

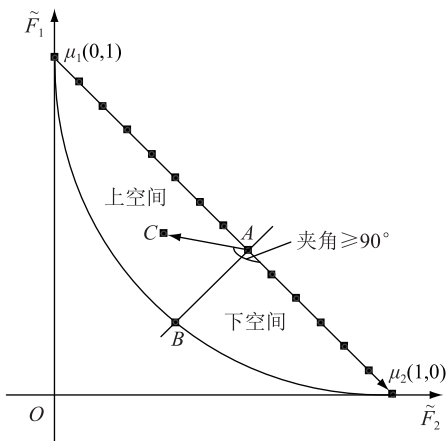


图2 NNC法求解原理示意

Fig.2 The schematic diagram of NNC method solution

以乌托邦线上的一个分割点 A 为例,对 NNC 法的求解原理进行分析。假设过点 A 的乌托邦线的法线与 Pareto 前沿交于点 B ,此时,点 B 即为最优解集中的一个可行解。以线段 AB 为分割线,将乌托邦线与 Pareto 前沿构成的封闭区域分割成上空间和下空间,从图2中可以看出,上空间内任一点 C 与点 A 构成的向量 \overrightarrow{AC} 与向量 $\overrightarrow{\mu_1\mu_2}$ 之间的夹角大于等于 90° 。而在上空间内,点 B 对应的归一化处理后的目标1的值是上空间中的最小值。因此,可以将问题的可行域约束在上空间中,以归一化处理后的目标1最小作为优化问题的目标函数,构建单目标优化模型,对其进行求解即可得到 Pareto 前沿上的点 B 。假设点 A 为第 k 个分割点(分割点的顺序从上向下进行排序),各向量有如下关系:

$$\begin{cases} \overrightarrow{\mu_1\mu_2} = \overrightarrow{O\mu_2} - \overrightarrow{O\mu_1} = (1,0) - (0,1) = (1, -1) \\ \overrightarrow{AC} = \overrightarrow{OC} - \overrightarrow{OA} = (\tilde{F}_2(x'), \tilde{F}_1(x')) - \\ (k/N, 1 - k/N) = (\tilde{F}_2(x') - \\ k/N, \tilde{F}_1(x') + k/N - 1) \\ \overrightarrow{AC} \cdot \overrightarrow{\mu_1\mu_2} \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

此时,获取 Pareto 前沿上的点的单目标优化问题可写为:

$$\begin{aligned} & \min \tilde{F}_1(x') \\ \text{s.t.} & \begin{cases} h(x') = 0 \\ \underline{g} \leq g(x') \leq \bar{g} \\ \overrightarrow{AC} \cdot \overrightarrow{\mu_1\mu_2} \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

基于分割点 A ,对式(19)所示单目标优化问题进行求解即可得到点 B ,分别对 N 个分割点进行单目标优化计算,便可以得到归一化多目标问题的 Pareto 最优解集。获取 Pareto 候选解集后,运行人员需从中选择一个解来指导优化调度,为此,文中采用 Fuzzy 选择策略^[17]来获取满足运行人员需求的最优折衷松弛解。定义候选最优解集中第 k 个解中目标 t 与其最小值之间的偏移程度 u_t^k 为:

$$u_t^k = \begin{cases} 0 & \tilde{F}_t \leq \tilde{F}_t^{\min} \\ \frac{\tilde{F}_t - \tilde{F}_t^{\min}}{\tilde{F}_t^{\max} - \tilde{F}_t^{\min}} & \tilde{F}_t^{\min} < \tilde{F}_t < \tilde{F}_t^{\max} \\ 1 & \tilde{F}_t \geq \tilde{F}_t^{\max} \end{cases} \quad (20)$$

式中: \tilde{F}_t^{\max} 为目标 t 的最大可接受值; \tilde{F}_t^{\min} 为目标 t 的最小可接受值; $k=1,2,\dots,N;t=1,2$ 。

此时,可定义第 k 个解对应的各目标函数值的

综合偏移程度 u_i 为:

$$u_i = \frac{\sum_{k=1}^2 u_i^k}{\sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 u_i^k} \quad (21)$$

因此,可以选取综合偏移程度最小的候选解作为最优折衷解指导运行人员进行优化调度。

2.3 多阶段算法的第三阶段

文中所提多阶段算法的第三阶段优化的目的是将第二阶段所得最优折衷解中的整数变量进行归整,从而获取原问题的最优折衷整数解。罚函数法通过在目标函数中引入惩罚项将整数变量惩罚到整数解上,在求解过程中只涉及连续的优化模型,具有较高求解效率。因此,将基于罚函数法思想对整数变量进行归整。根据罚函数法的基本思路,所选取的罚函数需要满足以下性质:(1)当离散变量远离整数值时,罚函数的函数值很大,明显高于原函数值;(2)当离散变量趋近整数值时,罚函数的值应趋近于零,从而不对原函数值产生影响。考虑到三角函数 $y = \cos(x)$ 的图像在 $[-\pi/2, \pi/2]$ 的图像关于 y 轴对称且其图像与 x 轴有 2 个交点,可以满足对罚函数的需求。因此,文中引入式(22)所示罚函数对目标函数进行修正。

$$\varphi(y) = \beta \sum_{i=1}^{n_y} \cos[\pi(y_i - v_i)] \quad (22)$$

式中: β 为惩罚因子; n_y 为离散变量的个数; y_i 为第 i 个离散变量; v_i 为领域中心,为保证端点处罚函数的值相同,取 $v_i = \lfloor y_i^0 \rfloor + 0.5$,其中“ $\lfloor \cdot \rfloor$ ”表示向下取整; y_i^0 为最优折衷松弛解中第 i 个离散变量的取值。

由式(22)可以看出,该罚函数中,只存在一个待定参数,而在归一处理后的单目标优化模型中,目标函数的最大值仅为 1。因此,只需令惩罚因子比目标函数最大值大一个数量级,即可保证罚函数的惩罚作用。为此,文中取 β 的值为 10。图 3 给出含 2 个变量的函数分布图,可以看出,该函数仅在端点处的取值为零,且函数值沿远离端点的方向迅速增加,恰好可以满足罚函数法的相关需求,因此,该罚函数是合理且有效的。

此时,第三阶段的优化模型可表示为:

$$\begin{aligned} & \min \tilde{F}_1(x, y) + \varphi(y) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} h(x, y) = 0 \\ \underline{g} \leq g(x, y) \leq \bar{g} \\ \overrightarrow{AC} \cdot \overrightarrow{\mu_1 \mu_2} \leq 0 \\ \lfloor y_0 \rfloor \leq y \leq \lfloor y_0 \rfloor + 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (23)$$

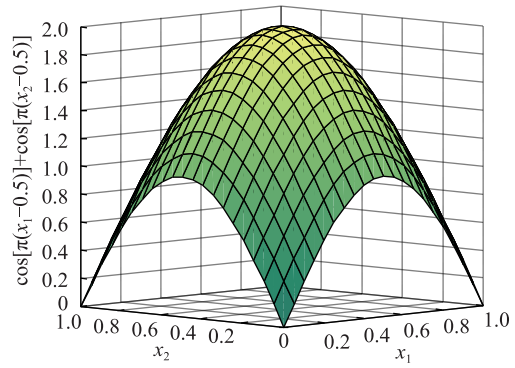


图 3 含双变量的三角函数

Fig.3 Triangular penalty function image with two variables

至此,多阶段算法 3 个阶段的优化模型就已全部表述完全,其简要流程如图 4 所示。

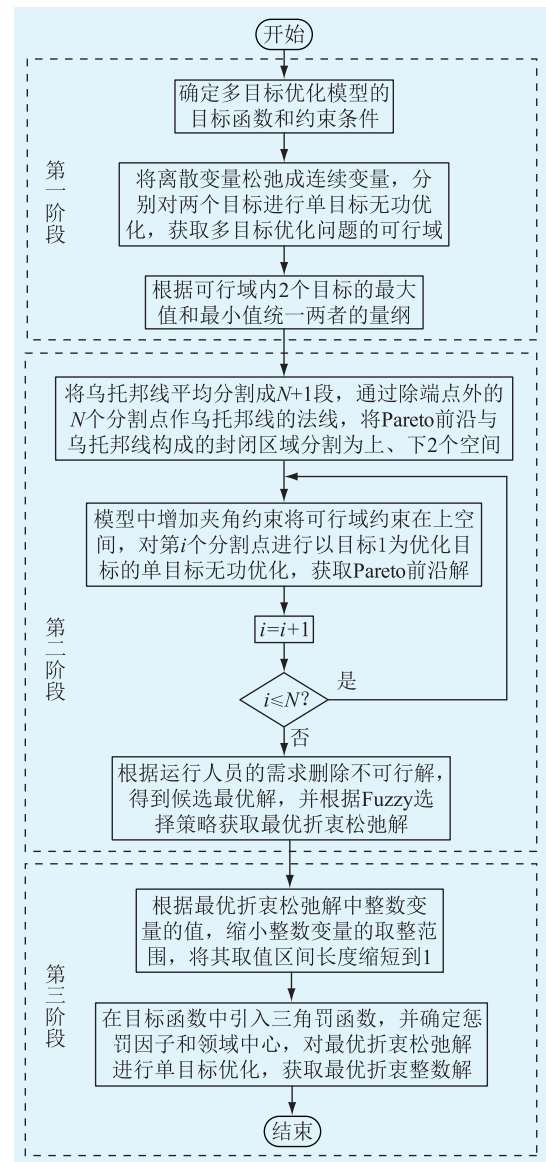


图 4 多阶段算法的求解流程

Fig.4 Solution flow chart of the multi-stage algorithm

3 算例分析

为对多目标多阶段无功算法的有效性 UPFC 在无功优化领域的控制效果进行验证,文中基于南京西环网 UPFC 工程展开相关测试。数据来源于江苏电网实际运行数据,为凸显 UPFC 在无功优化领域的作用,首先对其进行等值处理,等值前后的系统信息和 UPFC 相关参数如附录 A2 所示。为丰富系统中的元素,更全面地对 UPFC 的控制效果进行验证,在滨南接入 1 组风电机组,其部分参数如附录 A3 所示。而 UPFC 接入点位置与实际工程相同^[18],其接入点附近的拓扑结构示意图如附录 A4 所示。为方便计算,取有载变压器的可调档位均为 $1 \pm 0.025 \times 4$ 。由于文中将无功设备动作次数的约束还原成经济性考量对目标函数进行修正,使其时段间解耦,因此具有更广泛的适用范围。而为对算法的有效性和适应性进行验证,文中将分别从静态无功优化和动态无功优化的角度对算法进行验证。

3.1 无功优化算法的优化效果验证

为说明其在静态无功优化方面的有效性,同时对多阶段算法的有效性进行验证,首先基于负荷较重的上午 10 时的数据进行单断面多目标无功优化计算。文中取 N 为 20,也即将乌托邦线分割成 21 段,表 1 给出第 2 阶段优化所得的松弛候选最优解集,图 5 给出候选解集的分布示意图。附录 A5 给出该电容抗/器的动作情况。

表 1 NNC 法所得松弛最优解集
Table 1 Relaxed optimal solution set obtained by NNC method

分割点 编号	f_1/MW	$f_2/\text{p.u.}$	分割点 编号	f_1/MW	$f_2/\text{p.u.}$
1	37.146	0.000 2	11	26.555	0.024 2
2	35.819	0.000 2	12	26.122	0.032 1
3	34.493	0.000 2	13	25.868	0.041 7
4	33.179	0.000 3	14	25.690	0.052 0
5	31.919	0.000 9	15	25.566	0.062 7
6	30.747	0.002 3	16	25.463	0.073 7
7	29.653	0.004 4	17	25.373	0.084 7
8	28.665	0.007 4	18	25.296	0.095 9
9	27.818	0.011 7	19	25.235	0.107 2
10	27.124	0.017 4	20	25.196	0.118 7

优化前该断面的初始有功网损为 36.208 MW,初始电压偏差和为 0.031 2 p.u.。由表 1 中第 11 组数据可得,即使保持系统的电压偏差不变,其有功网损也至少可以减少到 26.555 MW(不考虑变量离散性的情况下),表明系统当前的运行方式仍存在

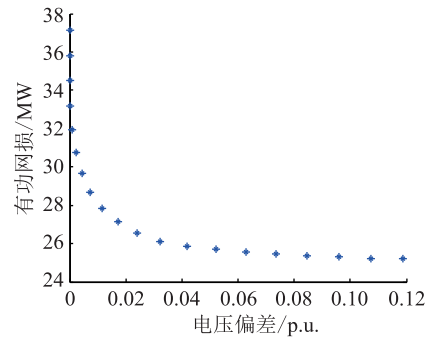


图 5 NNC 法所得候选解分布示意

Fig.5 Schematic diagrams of candidate solutions obtained by NNC method

较大的优化空间。对比 20 组解中有功网损和电压偏差的变化趋势可以看出,随着有功网损的降低,系统的电压偏差逐渐增大,这说明以有功网损最小作为目标函数的单目标优化是以降低了系统的安全性作为代价的。因此,随着电力系统的规模化和复杂化程度日益加深,文中所提出的兼顾系统运行安全性和经济性的多目标无功优化模型更符合系统运行的实际需求。而从图 5 可见,文中将乌托邦线分割成 21 段已可获得分布足够均匀的 Pareto 最优解集,因此, N 取 20 已能满足系统的运行需求。计算时间方面,在进行单断面无功优化计算时,文中提出的多阶段算法耗时大约 10 s,其中第二阶段优化计算花费约 87% 的时间,这是因为在该阶段优化中,需要进行 20 次单目标优化计算,因此,若对该阶段进行并行计算,则可以大幅提高算法的求解效率,以满足实际运行过程中对计算效率的需求。

为验证其在动态无功优化领域的有效性,将 24 个断面的运行数据作为负荷预测结果,采用第 2 节所述多阶段求解算法对第 1 节所述模型进行求解,优化前后 24 个断面的有功网损情况和电压偏差情况如图 6 所示。可以看出,在有功网损方面,优化后的系统有功损耗明显降低,定量地,24 个断面中最大可降损 29.19%,最小可降损 6.18%,平均可降损 18.75%。而由于优化后的等效网损中包含了无功设备调整的代价,因此,文中所提无功优化方法的实际降损效果要比上述结果更好。电压偏差方面,优化后的系统电压偏差之和也要明显低于优化前的电压偏差和,定量地,24 个断面中最大可减小 66.63%,最小可减小 20.00%,平均可减小 32.91%。上述结果表明文中提出的多目标多阶段无功优化算法可以同时有效提高系统运行的经济性与稳定性,相较于单目标无功优化具有更高的实际应用价值。

为进一步说明运用多目标多阶段无功优化算法给系统带来的优化效果,选取时间断面 20 时作为

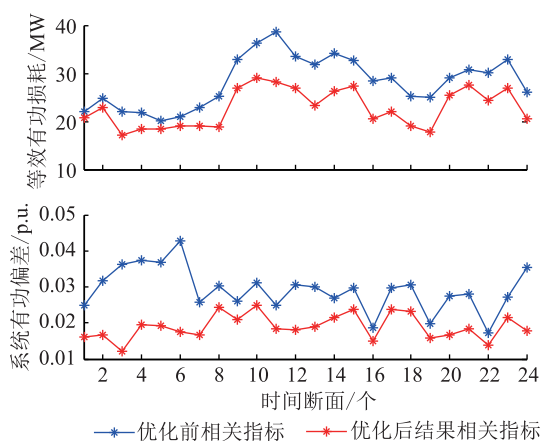


图6 优化前后系统有功网损和电压偏差对比

Fig.6 Comparison of active power loss and voltage deviation before and after optimization

一个典例,该时间断面无功负荷最大,系统电压最低,在图7中对其优化前后系统电压进行对比,不难看出:进行优化后,系统的最低电压明显上升,这表明系统运行的安全性和稳定性有所提升。

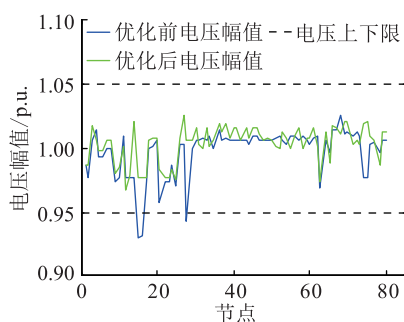


图7 时间断面20优化前后系统电压幅值对比

Fig.7 Comparison of voltage before and after optimization based on time section 20

3.2 无功设备动作次数约束处理方法有效性验证

3.1节对文中提出的无功优化算法的有效性进行了详细的验证,本节将对无功设备动作次数约束的处理方法的有效性进行验证。为此,对南京西环网进行以下2种算例测试:(1)不考虑变压器和无功补偿设备的调整代价,即以式(3)和式(4)为目标函数进行多目标无功优化,获取系统无功设备的调整次数信息;(2)考虑变压器和无功补偿设备的调整代价,即以式(4)和式(6)为目标函数进行多目标无功优化,获取系统无功设备的调整次数信息。2种情况下无功设备的调整次数对比结果如图8所示。从结果可以看出,在同样满足运行人员需求的情况下,考虑设备的调整代价后,24个断面无功设备的总动作次数由894次减少到155次,表明提出的多目标多阶段无功优化算法可以在尽量减少变压器和无功补偿装置等无功设备调整的前提下,从

长远意义上有效提高系统运行的安全性与经济性。

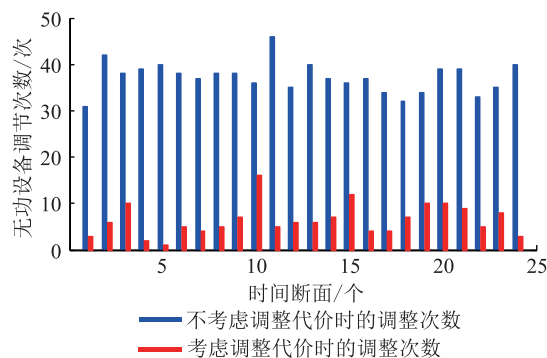


图8 考虑调整代价前后无功设备调整次数对比

Fig.8 Comparison of reactive power equipment adjustment number before and after considering adjustment cost

3.3 UPFC 控制效果验证

为验证UPFC在降低电网有功网损和电压偏差方面的优化效果,首先基于有功负荷较重的上午10时的数据分别进行含UPFC和无UPFC的单断面多目标无功优化计算,表2给出2种情况下NNC法所求得的最优候选解。

表2 UPFC参与调节前后松弛最优解集对比

Table 2 Comparison of optimal relaxation solution sets before and after UPFC involvement in regulation

编号	f_1/MW		$f_2/\text{p.u.}$	
	无UPFC	含UPFC	无UPFC	含UPFC
1	37.15	44.35	0.000 2	0.000 1
2	35.82	42.22	0.000 2	0.000 1
3	34.50	40.08	0.000 2	0.000 1
4	33.18	37.95	0.000 3	0.000 1
5	31.92	35.82	0.000 9	0.000 1
6	30.75	33.69	0.002 3	0.000 2
7	29.65	31.71	0.004 4	0.001 0
8	28.67	30.01	0.007 4	0.003 5
9	27.82	28.58	0.011 7	0.007 5
10	27.12	27.51	0.017 4	0.013 6
11	26.56	26.73	0.024 1	0.021 3
12	26.12	26.16	0.032 1	0.030 2
13	25.87	25.85	0.041 7	0.040 6
14	25.69	25.65	0.052 0	0.051 6
15	25.57	25.52	0.062 7	0.063 0
16	25.46	25.41	0.073 7	0.074 5
17	25.37	25.32	0.084 7	0.086 1
18	25.30	25.24	0.095 9	0.097 9
19	25.23	25.18	0.107 2	0.109 7
20	25.20	25.14	0.118 7	0.121 6

一方面,UPFC参与调节后,系统的电压偏差和有功损耗的最小值进一步减小,表明UPFC在优化这2个指标方面具有一定的效果。另一方面,UPFC

进一步降低某一指标最小值的代价是增加另一个指标最大值,这一结果更加体现了进行多目标无功优化计算的必要性。从相对优化效果来看,UPFC参与调节后有功损耗最小值降低了0.21%,电压偏差的最小值则降低了32.04%,可以看出,UPFC在降低系统电压偏差方面具有更好的控制效果。总的来说,UPFC参与调节后,存在可以同时提高系统运行安全性和经济性的解,验证了UPFC在无功优化领域的应用前景。

同样地,对24个断面分别进行含UPFC和无UPFC的多目标无功优化计算,所得结果如图9所示。可以看出,UPFC参与调节后,系统的电压偏差相较无UPFC时大幅降低,最大降幅为57.00%,最小降幅为8.12%,平均降幅为28.42%,但与此同时,系统的有功损耗有所增加,最大增幅为6.32%,最小增幅为0.07%,平均增幅为2.61%。上述结果基于Fuzzy选择原则的折衷解选取方法可以较好的权衡UPFC的调控能力,通过略微牺牲系统运行的经济性来大幅提高系统运行的安全性。

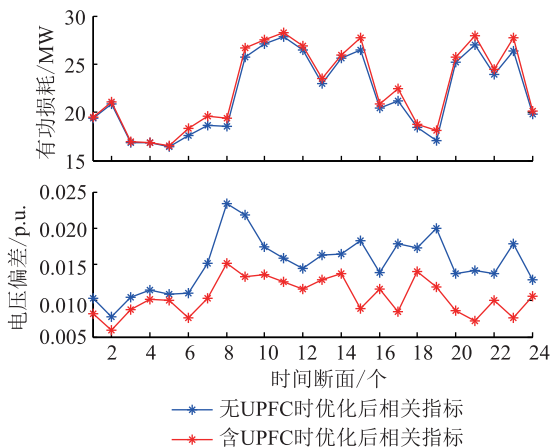


图9 UPFC参与调节前后系统相关指标对比

Fig.9 Comparison of relevant indicators before and after UPFC involvement in regulation

4 结论

文中提出计及UPFC的多目标多阶段优化算法,并基于南京西环网实际等值系统对算法的有效性和UPFC在无功优化领域的应用效果进行了验证,可以得到以下结论:

(1) 文中利用中间变量构建了绝对值项的松弛等效模型,降低了模型的求解难度,收敛性较好;采用NNC法和三角罚函数法进行求解,可有效将连续变量归整至整数值,获取较为均匀的Pareto前沿,具有较好的求解效果;

(2) 所提算法可兼顾系统运行的经济性和安全

性,既适用于静态无功优化领域,也适用于动态无功优化领域,有效降低系统有功损耗和电压偏差。同时,算法可有效减少无功设备的动作次数,若采用并行计算的手段,可进一步提高算法的求解效率;

(3) 后续可从模型的角度对无功优化模型进行线性化处理,以进一步提高模型的求解效率,增加其实际应用价值。

参考文献:

- [1] 朱梓荣,卫志农,赵静波,等. 基于内点半定规划法的含UPFC的最优潮流[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):92-99.
ZHU Zirong, WEI Zhinong, ZHAO Jingbo, et al. Optimal power flow with UPFC based on semi-definite programming[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11):92-99.
- [2] 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 Haoming, et al. Control capability analysis of unified power flow controller considering real-time control strategy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1):1-7.
- [3] 鲁裕婷,赵天乐,都洪基,等. 基于改进粒子群算法的含DG配电网无功优化[J]. 电力工程技术,2018,37(6):69-74.
LU Yuting, ZHAO Tianle, DU Hongji, et al. Reactive power optimization of distribution network with distributed generation based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6):69-74.
- [4] 吴霜,季聪,孙国强. 含分布式储能的配电网多目标运行优化策略研究[J]. 电力工程技术,2018,37(2):20-26.
WU Shuang, JI Cong, SUN Guoqiang. Multiple objection operation strategy optimization research of distribution network including distributed energy storage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2):20-26.
- [5] 刘明波,朱春明,钱康龄,等. 计及控制设备动作次数约束的动态无功优化算法[J]. 中国电机工程学报,2004,24(3):34-40.
LIU Mingbo, ZHU Chunming, QIAN Kangling, et al. Dynamic reactive-power optimization algorithm incorporating action number constraints of control devices[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3):34-40.
- [6] 覃海,姬源,周川梅,等. 计及控制设备动作次数约束的三阶段动态无功优化算法[J]. 电力自动化设备,2018,38(9):179-186.
QIN Hai, JI Yuan, ZHOU Chuanmei, et al. Three-stage dynamic reactive power optimization algorithm considering constraints of control device action times[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9):179-186.
- [7] 赵晋泉,居俐洁,戴则梅,等. 基于分支定界-原对偶内点法的日前无功优化[J]. 电力系统自动化,2015,39(15):55-60.
ZHAO Jinquan, JU Lijie, DAI Zemei, et al. Day-ahead reactive power optimization based on branch and bound-interior point method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39

- (15):55-60.
- [8] 陈浩,王健. 基于差分粒子群算法的变电站选址定容规划[J]. 电力工程技术,2018,37(3):118-122.
CHEN Hao, WANG Jian. The optimization of substation locating and sizing based on DEPSO algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(3): 118-122.
- [9] 邓长虹,马庆,肖永,等. 基于自学习迁移粒子群算法及高斯罚函数的无功优化方法[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3341-3346.
DENG Changhong, MA Qing, XIAO Yong, et al. Reactive power optimization based on self-learning migration particle swarm optimization and Gaussian penalty function[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3341-3346.
- [10] KONAK A, COIT D W, SMITH A E. Multi-objective optimization using genetic algorithms: a tutorial[J]. Reliability Engineering and Systems Safety, 2006, 91(9): 992-1007.
- [11] KIM I Y, WECK O L D. Adaptive weighted sum method for multiobjective optimization: a new method for Pareto front generation[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2006, 31(2): 105-116.
- [12] ZHANG W, YUTIAN L. Multi-objective reactive power and voltage control based on fuzzy optimization strategy and fuzzy adaptive particle swarm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2008, 30(9): 525-532.
- [13] MESSAC A, ISMAIL-YAHAYA A, MATTSON A. The normalized normal constraint method for generating the Pareto frontier[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2003, 25(2): 86-98.
- [14] 国网江苏省电力公司. 统一潮流控制器工程实践—南京西环网统一潮流控制器示范工程[M]. 北京:中国电力出版社, 2015: 15-20.
State Grid Jiangsu Electric Power Company. Unified power flow controller engineering practice[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015: 15-20.
- [15] 张勇军,俞悦,任震,等. 实时环境下动态无功优化建模研究[J]. 电网技术, 2004, 28(12): 12-15.
ZHANG Yongjun, YU Yue, REN Zhen, et al. Research on dynamic modeling for reactive power optimization under real-time circumstance[J]. Power System Technology, 2004, 28(12): 12-15.
- [16] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社, 2003: 120-134.
WANG Xifan. Modern power system analysis[M]. Beijing: Science Press, 2003: 120-134.
- [17] ABIDO M A. Multiobjective evolutionary algorithms for Electric power dispatch problem[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10(3): 315-229.
- [18] 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.

作者简介:



孙蓉

孙蓉(1979),女,博士在读,研究方向为电力系统分析、新能源并网技术(E-mail: sun_rong2012@163.com);

朱梓荣(1994),男,硕士在读,研究方向为电力系统优化运行;

王志农(1962),男,博士,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化等。

附录 A

A1 绝对值替换公式中变量取值合理性证明

为满足式(7)所示约束, Δu_1 和 Δu_2 中至少有一个数小于 \sqrt{M} , 即小于 10^{-3} , 因此当无功设备动作时 Δu_1 和 Δu_2 中必定会有一个数大于等于 $1+10^{-3}$ 。假设 $\Delta u_1 = A(A \geq 1 + 10^{-3})$, 则 $\Delta u_2 < M/A < M = 10^{-6}$ 。因此, 该松弛条件已足够保证其中一个数趋近于零, 满足模型的需求。

A2 等值前后系统相关参数对比

表 A1 等值前后系统相关参数对比

Table A1 Comparison of relevant parameters of the system before and after equivalence

参数名	等值前	南京西环网
节点数/个	1 399~1 402	79~82
发电机数/台	296	4
支路数/条	2 443~2 446	129~132
电容、抗器数/个	579	11
变压器数/台	1 669	40

表 A2 南京西环网 UPFC 工程中 UPFC 的相关参数

Table A2 Relevant parameters of UPFC in Nanjing xihuan network UPFC project p.u.

参数名	参数值	参数名	参数值
R_E	0	\bar{U}_E	1.2
X_E	0.1	\underline{U}_E	0
R_B	0	\bar{U}_B	0.2
X_B	0.1	\underline{U}_B	0

A3 风电场风机参数

风电场具体参数: 单个风机具体参数如下表, 风电场由 100 台风机组。

表 A3 风电机组具体参数

Table A3 Wind turbine specific parameters

项目	数值
风机型号	W2000-87
切出风速/($m \cdot s^{-1}$)	25
风轮直径/m	93
额定风速/($m \cdot s^{-1}$)	12
切入风速/($m \cdot s^{-1}$)	3
额定功率/MW	2

A4 UPFC 接入点拓扑结构

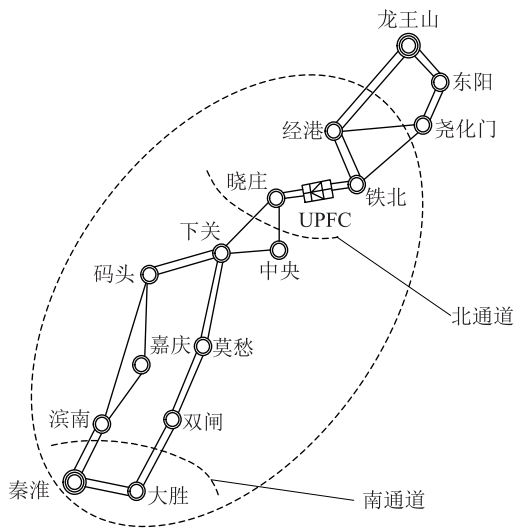


图 A1 UPFC 接入点附近拓扑结构示意图
Fig.A1 Topology near UPFC access point

A5 电容抗器调整情况

表 A4 10 时电容抗器的调整情况

Table A4 The adjustment of the capacitor reactance in 10

电容/抗器 节点名	上个时段 投入组数 /组	当前时段 投入组数 /组	单组 容量/ Mvar	总组 数/组
淮安换流 站 525.2	2	3	270	4
秦淮 35.2	2	2	-60	3
秦淮 35.3	0	0	60	2
东善桥 35.2	1	1	60	2
东善桥 35.3	1	1	60	2
三汊湾 535.2	0	0	-150	1
三汊湾 35.1	0	0	-60	2
三汊湾 35.2	0	0	-60	2
龙王山 35.2	1	1	60	1
龙王山 35.3	2	1	-60	3
上党 35.2	1	1	60	1

Multi-objective and multi-stage reactive power optimization algorithm for power system considering UPFC

SUN Rong, ZHU Zirong, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, LIAO Xingxing

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Unified power flow controller (UPFC) provides a new control method for reactive power optimization in power system. Based on this, the UPFC steady-state model suitable for the new UPFC topology is first established and introduced into the reactive power optimization problem. Then, the objective function and constraints of the multi-objective reactive power optimization problem are defined by considering the constraints of the number of reactive power equipment actions, and a multi-objective reactive power optimization model considering UPFC is established. Then, a multi-stage method is proposed to solve the problem. In the first stage, the original problem is relaxed and normalized to unify the dimensions of multiple objectives; in the second stage, the Pareto optimal candidate solution set of the relaxation problem is obtained based on the normalized plane constraint method, and the selection method of the compromise solution is given. In the third stage, the integer variables in the compromise solution are reorganized based on the triangular penalty function method to obtain the optimal compromise integer solution of the original problem. Finally, the optimal compromise integer solution of the original problem is obtained. The actual equivalent system of Nanjing western power grid is tested by an example, which verifies the effectiveness of the algorithm and the application prospect of UPFC in reactive power optimization.

Keywords: unified power flow controller; multiobjective reactive power optimization; multistage optimization method; normalized normal constraint method; triangular penalty function method

(编辑 钱悦)