

计及设备动作次数约束与UPFC的无功优化算法

赵静波¹, 卫志农², 朱梓荣², 孟 侠¹

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要:统一潮流控制器(UPFC)为电力系统无功优化提供了新的控制手段。针对实际工程中的新型拓扑,建立UPFC的多端注入功率模型和功率方程;基于将无功设备动作次数的约束还原成调节代价的思想,提出一种只含连续变量的基于原-对偶内点法的两阶段无功优化算法。南京西环网等值系统的算例测试结果表明,所提算法具有较高的计算精度和求解效率,可以有效减少无功设备的动作次数。

关键词:统一潮流控制器;无功优化;原-对偶内点法;两阶段优化

中图分类号:TM 732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202009006

0 引言

南京西环网 220 kV 统一潮流控制器 UPFC (Unified Power Flow Controller) 示范工程(简称“南京工程”)和苏州南部电网 500 kV UPFC 示范工程(简称“苏南工程”)的相继投运,验证了 UPFC 在电网中的工程应用价值,同时也标志着我国 UPFC 相关技术的逐步成熟^[1-4]。由于 UPFC 通过转移潮流的手段实现对线路功率的调整,在一定程度上会改变系统潮流分布,因此,从工程应用的角度,现阶段其潮流控制能力在系统优化运行方面的参与度难以得到有效提升^[5-6]。但 UPFC 的并联侧可以连续地对其接入母线的无功注入功率进行调节,为电网的无功优化提供了一种新的调节手段^[7-8]。为此,本文研究计及 UPFC 的无功优化问题,以提高 UPFC 工程的资源利用率。

动态无功优化是电力系统无功优化领域的一个分支,其通过对电网无功调节手段的优化控制,改善电网的无功分布情况,减少系统有功损耗,是实现电力系统安全经济运行的重要手段^[9-10]。研究计及 UPFC 的动态无功优化问题有利于在充分发挥 UPFC 调控能力的同时进一步提高电网运行的安全经济性^[11-12]。但动态无功优化问题中存在大量的离散变量,给算法的收敛性和求解效率带来一定的挑战。此外,虽然动态无功优化在静态无功优化的基础上考虑无功设备动作次数约束,避免了因追求经济运行而造成无功设备频繁动作,但这也使得动态无功优化问题时段间耦合,导致问题的求解难度显著增加。因此,如何处理无功设备动作次数约束以减小

模型的复杂度,也是动态无功优化需要解决的问题之一。

文献[13]针对离散变量建立无功优化的现代智能算法,但这类算法的低效性限制了其实用化;文献[14]通过将二次罚函数直接嵌入原-对偶内点法,实现对离散变量的逐步归整;文献[15]基于高斯罚函数和内点法对离散变量进行连续化处理,并分析不同参数对算法的影响;文献[16]通过静态优化计算制定无功设备的预动作时刻表,从而减轻了各时段间的耦合程度;文献[17]提出一种基于启发搜索及变量校正的两阶段求解方法,实现了动作次数的最优分配;在此基础上,文献[18]以灵敏度矩阵表述模型的校正过程,减小了模型的求解难度。但上述算法中无功设备均按其动作次数上限进行调节,且仍未真正实现时段间解耦,使其具有一定的局限性。为此,文献[19]将无功设备动作次数约束以调整代价的形式引入目标函数中,但未对其中的绝对值符号进行处理,模型求解难度较大。

针对南京工程中 UPFC 的新型拓扑,本文提出和推导了 UPFC 的多端注入功率模型,该模型适用于典型 UPFC 拓扑和串联于多条线路的 UPFC 拓扑。然后,基于将无功设备动作次数约束还原成调节代价的思想,并采用松弛方法对其中的绝对值符号进行等价代换,最终提出一种仅包含连续变量的两阶段无功优化算法,从而保证了无功优化问题的求解效率和精度。南京西环网和苏州南部电网实际系统的算例测试结果验证了该算法的有效性和 UPFC 在无功优化问题中的工程应用前景。

1 UPFC 的多端注入功率模型

南京工程和苏南工程中 UPFC 的拓扑结构示意图如图 1 所示,由于两者串联侧和并联侧的相对位置存在差异,可分别将其看作传统 UPFC 模型和新型 UPFC 模型,现有文献主要针对传统 UPFC 模型进

收稿日期:2020-01-09;修回日期:2020-07-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607092);国网江苏省电力有限公司科技项目(2017047)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51607092) and the Science and Technology Program of State Grid Jiangsu Electric Power Co.,Ltd.(2017047)

行分析和建模。而从图1可看出,当南京工程UPFC拓扑中母线1和母线3为同一母线时,两者的拓扑结构相同,因此,苏南工程UPFC拓扑可以看成是南京工程UPFC拓扑的一个特例。为此,本文将从南京工程中的新型UPFC拓扑出发,建立UPFC的多端注入功率模型及功率方程,并分析其适用性。

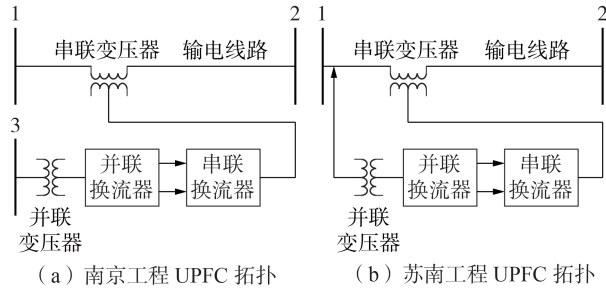


图1 南京工程和苏南工程UPFC拓扑对比

Fig.1 Topology comparison of UPFC between Nanjing Project and Southern Suzhou Project

将UPFC的作用等效为对相关节点的功率注入,其等效模型如图2所示。图中, U_m 、 U_n 和 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; Z_1 和 B_1 分别为UPFC串联侧所在线路的阻抗和对地导纳; P_{m0} 、 P_{n0} 和 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} 和 Q_{r0} 分别为UPFC对节点 m 、 n 和 r 的等效注入无功功率。

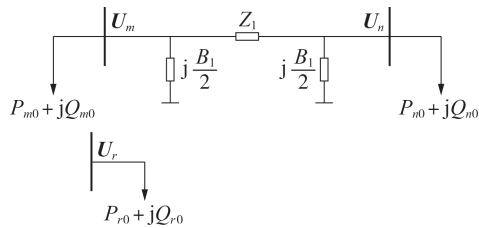


图2 新型UPFC拓扑的等效注入功率模型

Fig.2 Equivalent injection power model of novel UPFC topology

UPFC接入后,线路 $m-n$ 上的总功率为:

$$\begin{cases} S_{mn}^1 = U_m \left[(U_m + U_B)^* \left(\frac{jB_1}{2} \right) + (U_m + U_B - U_n)^* \left(\frac{1}{Z_1} \right) \right] \\ S_{nm}^1 = U_n \left[U_n^* \left(\frac{jB_1}{2} \right) + (U_n - U_B - U_m)^* \left(\frac{1}{Z_1} \right) \right] \end{cases} \quad (1)$$

其中, U_B 为UPFC串联侧等效电压源的电压相量; S_{mn}^1 和 S_{nm}^1 分别为UPFC接入后由节点 m 流向节点 n 和由节点 n 流向节点 m 的总复功率。

因此,UPFC对相关节点的等效注入功率为两者的差值,即:

$$\begin{cases} P_{m0} = U_m U_B [g_1 \cos \theta_{mB} + (B_1/2 + b_1) \sin \theta_{mB}] \\ Q_{m0} = U_m U_B [g_1 \sin \theta_{mB} - (B_1/2 + b_1) \cos \theta_{mB}] \\ P_{n0} = -U_n U_B (g_1 \cos \theta_{nB} + b_1 \sin \theta_{nB}) \\ Q_{n0} = -U_n U_B (g_1 \sin \theta_{nB} - b_1 \cos \theta_{nB}) \\ P_{r0} = U_r U_E \sin \theta_{rE} / X_E \\ Q_{r0} = -U_r U_E \cos \theta_{rE} / X_E \end{cases} \quad (2)$$

其中, U_m 、 U_n 、 U_r 、 U_B 为相应电压相量的幅值; U_E 为UPFC并联侧等效电压源的电压相量 U_E 的幅值; X_E 为UPFC并联侧的等效电抗; g_1 和 b_1 分别为线路 $m-n$ 上的电导和电纳; θ_{mB} 为节点 m 的电压相角与串联侧等效电压相角的差值; θ_{nB} 为节点 n 的电压相角与串联侧等效电压相角的差值; θ_{rE} 为节点 r 的电压相角与并联侧等效电压相角的差值。

需要说明的是,该模型同样适用于典型UPFC拓扑和图3所示的串联于多条线路的UPFC拓扑。对于典型UPFC拓扑,只需令 $m=r$,即将串联侧首端的注入功率和并联侧注入功率均附加至同一节点。而对于串联于多条线路的UPFC拓扑,对每条支路均按式(2)计算附加功率,并拓展成式(3),即此时系统注入并联侧的有功功率等于所有串联侧注入系统的有功功率之和。

$$P_E + \sum_{i=1}^{N_U} P_B^i = 0 \quad (3)$$

其中, P_E 为系统注入并联侧的有功功率; P_B^i 为系统注入第 i 台UPFC的有功功率; N_U 为UPFC串联的支路数。

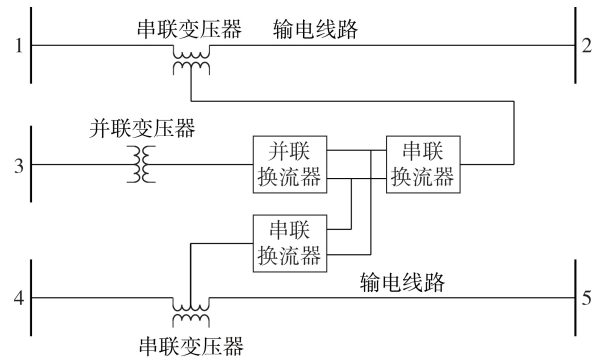


图3 串联于多条线路的UPFC拓扑

Fig.3 UPFC topology in series with multiple lines

2 计及UPFC的动态无功优化算法

2.1 目标函数

本文选用式(4)所示的系统有功网损最小作为无功优化问题的目标函数,从而在保证系统满足安全运行需求的情况下提高系统运行的经济性。

$$\min f = \sum_{k=1}^{N_g} P_{Gk,t} - \sum_{x=1}^{N_l} P_{Dx,t} \quad (4)$$

其中, $P_{Gk,t}$ 为第 k 台发电机的有功出力; N_g 为发电机

数; $P_{Dx,t}$ 为节点 x 的有功负荷; N_b 为节点数。

为了延长无功设备的使用寿命以及减少运行人员的工作负担,本文以费用的形式表述有功网损,并将无功设备动作次数约束还原成操作成本对目标函数进行修正,以减少设备的操作次数。修正后的目标函数如式(5)所示。

$$\min f = \alpha H \left(\sum_{k=1}^{N_g} P_{Gk,t} - \sum_{x=1}^{N_b} P_{Dx,t} \right) + c_u |\Delta u| \quad (5)$$

其中, α 为电能单价; H 为优化时间间隔; c_u 为无功设备的单位操作成本,为 $N_c + N_T$ 维行向量, N_c 为电容(抗)器节点数, N_T 为变压器台数; $|\Delta u|$ 为无功设备的动作次数,为 $N_c + N_T$ 维列向量。

进一步地,令 $c'_u = c_u / (\alpha H)$,则可将目标函数简化为:

$$\min f = \sum_{k=1}^{N_g} P_{Gk,t} - \sum_{x=1}^{N_b} P_{Dx,t} + c'_u |\Delta u| \quad (6)$$

在实际工程中,无功设备的调整代价可根据设备的投入成本、期望使用年限等因素进行估算^[19]。经统计, c'_u 的元素取值一般介于 3~10 kW/次之间。本文设定所有无功设备的调整代价 c'_u 的元素取值均为 8 kW/次。而从式(6)可以看出,变压器档位的增减和电容(抗)器的投切都被考量成设备动作,因此,需对变化量增加绝对值符号以表征设备的动作次数。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,本文引入非负中间变量 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项,修正后的目标函数可写为:

$$\min f = \sum_{k=1}^{N_g} P_{Gk,t} - \sum_{x=1}^{N_b} P_{Dx,t} + c'_u (\Delta u_1 + \Delta u_2) \quad (7)$$

为保证 Δu_1 和 Δu_2 能正确还原 $|\Delta u|$ 的值,需增加以下约束:

$$\begin{cases} \Delta u_1 - \Delta u_2 = u_1 - u_0 \\ f(\Delta u_1, \Delta u_2) = 0 \\ \Delta u_1, \Delta u_2 \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中, u_0 和 u_1 分别为离散变量的初始值和迭代过程中的当前值; $f(\Delta u_1, \Delta u_2)$ 表示矩阵 Δu_1 和 Δu_2 中对位置元素相乘。

由于式(8)中含有平衡约束 $f(\Delta u_1, \Delta u_2) = 0$,该约束使其导函数不满足连续可导性要求,在一定程度上会给模型的求解带来困难。为此,本文将该约束进行松弛,将其改写为 $f(\Delta u_1, \Delta u_2) < M$,其中 M 为一个极小数,本文取其值为 10^{-6} 。下面对该约束的合理性进行证明,为满足该约束, Δu_1 和 Δu_2 中至少存在 1 个元素小于 $\sqrt{M}$,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 1 个元素大于等于

$1+10^{-3}$ 。假设 Δu_1 中某元素值为 $A (A \geq 1+10^{-3})$,则 Δu_2 中同一位置元素小于 M/A ,即小于 $M=10^{-6}$,因此,该松弛条件已足够保证其中一个数趋近于 0,满足模型的需求。此时,式(8)可改写成式(9)所示形式。

$$\begin{cases} \Delta u_1 - \Delta u_2 = u_1 - u_0 \\ f(\Delta u_1, \Delta u_2) < M \\ \Delta u_1, \Delta u_2 \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

2.2 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参数,因此,本文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 $P_{lp,t}$ 和 $Q_{lp,t}$,末端的有功功率和无功功率分别为 $P_{lq,t}$ 和 $Q_{lq,t}$,则有:

$$\begin{cases} P_{lp,t} = f_1(U_{p,t}, U_{q,t}, \theta_{p,t}, \theta_{q,t}, T_l) \\ Q_{lp,t} = f_2(U_{p,t}, U_{q,t}, \theta_{p,t}, \theta_{q,t}, T_l) \\ P_{lq,t} = f_3(U_{p,t}, U_{q,t}, \theta_{p,t}, \theta_{q,t}, T_l) \\ Q_{lq,t} = f_4(U_{p,t}, U_{q,t}, \theta_{p,t}, \theta_{q,t}, T_l) \end{cases} \quad (10)$$

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 $U_{p,t}$ 、首端电压相角 $\theta_{p,t}$ 、末端电压幅值 $U_{q,t}$ 、末端电压相角 $\theta_{q,t}$ 和该支路上的变压器档位 T_l 的函数。此时,UPFC 串联侧所在的第 L 条支路的线路功率可写为:

$$\begin{cases} P_{Lm,t} = f_1(U_{m,t}, U_{n,t}, \theta_{m,t}, \theta_{n,t}, T_L) + P_{m0,t} \\ Q_{Lm,t} = f_2(U_{m,t}, U_{n,t}, \theta_{m,t}, \theta_{n,t}, T_L) + Q_{m0,t} \\ P_{Ln,t} = f_3(U_{m,t}, U_{n,t}, \theta_{m,t}, \theta_{n,t}, T_L) + P_{n0,t} \\ Q_{Ln,t} = f_4(U_{m,t}, U_{n,t}, \theta_{m,t}, \theta_{n,t}, T_L) + Q_{n0,t} \end{cases} \quad (11)$$

因此,以线路功率表达的传统节点 i 的功率平衡约束为:

$$\begin{cases} \sum_{k \in i} P_{Gk,t} - \sum_{p=i} P_{lp,t} - \sum_{q=i} P_{lq,t} - P_{Di,t} = 0 \\ \sum_{k \in i} Q_{Gk,t} - \sum_{p=i} Q_{lp,t} - \sum_{q=i} Q_{lq,t} - Q_{Di,t} + n_{Ci} \Delta C_i = 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中, $k \in i$ 表示第 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 0; 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:

$$\begin{cases} \sum_{k \in r} P_{Gk,t} - \sum_{p=r} P_{lp,t} - \sum_{q=r} P_{lq,t} - P_{Dr,t} - P_{r0,t} = 0 \\ \sum_{k \in r} Q_{Gk,t} - \sum_{p=r} Q_{lp,t} - \sum_{q=r} Q_{lq,t} - Q_{Dr,t} + n_{Cr} \Delta C_r - Q_{r0,t} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

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:

$$\begin{cases}
 \underline{P}_{Gk,t} \leq P_{Gk,t} \leq \bar{P}_{Gk,t} \\
 \underline{Q}_{Gk,t} \leq Q_{Gk,t} \leq \bar{Q}_{Gk,t} \\
 \underline{S}_{U,t} \leq S_{U,t} \leq \bar{S}_{U,t} \\
 \underline{U}_{i,t} \leq U_{i,t} \leq \bar{U}_{i,t} \\
 \underline{U}_{E,t} \leq U_{E,t} \leq \bar{U}_{E,t} \\
 \underline{U}_{B,t} \leq U_{B,t} \leq \bar{U}_{B,t} \\
 \underline{P}_{l,t} \leq P_{l,t} \leq \bar{P}_{l,t} \\
 \underline{T}_l \leq T_l \leq \bar{T}_l \\
 \underline{n}_{Gi} \leq n_{Gi} \leq \bar{n}_{Gi}
 \end{cases} \quad (14)$$

其中, $S_{U,t}$ 为 UPFC 上流过的功率; $P_{l,t}$ 为线路 l 上的有功功率; “ $\bar{\cdot}$ ” 和 “ $\underline{\cdot}$ ” 分别表示相应变量的上限值和下限值。

至此, 以式(7)为目标函数, 式(2)、(3)、(9)~(14)为约束条件的计及 UPFC 的动态无功优化模型就已表述完全。由于将动作次数约束直接还原成经济性指标对目标函数进行修正, 因此该模型相较于传统无功优化模型具有更广泛的应用范围, 既可适用于日前应用场景, 基于未来 24 h 的负荷预测结果进行动态无功优化计算, 也可适用于实时应用场景, 基于当前负荷状态进行实时无功优化计算。

2.3 基于原-对偶内点法的两阶段优化方法

由于变压器档位和电容(抗)器投入组数为离散的整数变量, 这造成优化模型为混合整数非线性优化的问题, 直接对模型进行求解存在极大难度。为此, 本文通过两阶段优化方法将模型转化为一个仅包含连续变量的非线性规划问题, 并且由于两阶段优化的最优解必然满足原问题的约束, 因此理论上构成了原问题的可行下限解。具体而言: 第1阶段将整数变量松弛为连续变量, 采用原-对偶内点法进行求解, 得到原无功优化问题的下界解 $\tilde{u}$; 第2阶段对 $\tilde{u}$ 进行就近归整, 其本质是将 0-1 离散整数变量连续化, 求解仅包含连续变量的优化模型, 可得到计及有限控制变量约束的无功优化问题的近似最优解(即下限最优解)。由于两阶段的优化均为连续模型, 模型的计算复杂度极大降低, 因此有效提高了模型的求解效率。算法的简要流程图见附录中图 A1。

3 算例分析

本文算例测试的数据来源为江苏电网的实际运行数据, 每小时取 1 个断面, 共 24 个断面。一方面, 江苏电网数据量庞大, 直接对其进行无功优化分析给计算的实时性和收敛性带来很大挑战; 另一方面, UPFC 的控制范围有限, 若在拥有一千多个节点的江苏电网内进行分析, 将无法凸显 UPFC 的作用, 结论性不强。为此, 本文首先对江苏电网数据进行等值

处理, 得到南京西环网等值系统, 等值前后系统的相关信息如表 1 所示。可以看出, 由于系统运行工况的变化, 24 h 内的系统拓扑并非恒定不变, 因此, 基于日前应用场景的动态无功优化可能无法满足系统实时工况变化的需求, 这也说明本文提出的时段间解耦的无功优化模型具有一定的优越性。

表 1 等值前后系统相关信息对比

Table 1 Comparison of system relevant information between before and after equivalence

系统	总节点数	发电机数/台	支路数/条	电容(抗)器节点数	变压器数/台
等值前	1399~1410	296	2443~2446	579	1669
等值后	79~82	4	129~132	11	40

本文等值系统中 UPFC 的接入位置与南京工程实际接入点相同, 接入点附近的简要拓扑示意图如附录中图 A2 所示^[20]。

3.1 算法的有效性验证

本文将无功优化问题转化为一个仅包含连续变量的两阶段优化问题, 实际上是通过略微牺牲所得调度策略的最优性来提高算法的求解效率。为说明该方法的有效性, 图 4 给出 24 个断面第 1 阶段和第 2 阶段得到的有功网损的对比图以及 24 个断面的计算时间曲线(该部分测试中 UPFC 无特殊控制需求, 串、并联侧均参与自由寻优)。

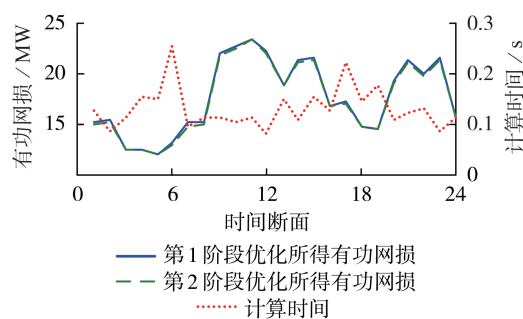


图 4 算法的计算精度与计算时间

Fig.4 Calculation accuracy and time of algorithm

由图 4 可知, 第 2 阶段得到的最优解与第 1 阶段十分接近, 二者的最大偏差为 1.84%, 最小偏差为 0.38%, 平均差距为 1.06%, 已可以满足无功优化问题对经济性的需求。需要说明的是, 由于第 1 阶段将整数变量松弛为连续变量, 其最优解并非为原问题严格的可行解, 但是可作为验证第 2 阶段有效性的参考。因此, 本文所提算法得到的次优解与最优解之间的差距要比上述数据更小。而在保证所得调度策略经济性的同时, 算法仍有较高的求解效率, 单个断面的平均计算时间仅为 0.13 s, 进一步说明了本文所提两阶段无功优化算法的有效性。

图 5 给出 24 个断面系统初始有功网损率和优化后有功网损率的对比图, 附录中图 A3 给出 4 个典型

断面优化前后的电压幅值曲线对比图。

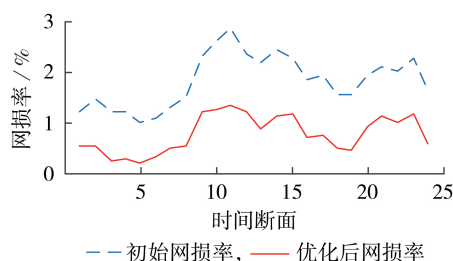


图5 优化前后系统网损率对比

Fig.5 Comparison of system loss rate between before and after optimization

从图5可以看出,本文提出的无功优化算法可大幅降低系统运行的有功损耗,从而有效提高系统运行的经济性。系统电压指标方面,如附录中图A3所示,所选的4个典型断面中均有部分节点的电压幅值不满足系统运行的安全约束要求,而采用本文提出的无功优化算法进行无功优化后,所有节点的电压幅值均能满足相关要求。若以电压合格率的方式描述系统电压水平,24个断面优化后系统的电压总合格率由初始的97.18%提高到100%。上述结果表明本文所提无功优化算法可以在降低系统运行有功损耗的同时,有效提高系统的电压质量。为验证本文中无功设备动作次数约束处理方法的有效性,分别以式(4)和式(7)为目标函数,采用2.3节中的两阶段优化算法进行求解,附录中图A4给出2种情况下各断面无功设备的动作情况。从图中可以看出,考虑无功设备调整代价后,24个断面无功设备的总动作次数由不考虑调整代价时的1067次减少到51次,这表明本文将无功设备动作次数约束还原成经济性考量对目标函数进行修正的方法,可以有效减少无功设备的调整次数,从而延长无功设备的使用寿命。

3.2 UPFC在无功优化问题中的应用效果验证

为验证UPFC在无功优化问题中的应用效果,采用2.3节中的两阶段优化算法分别进行含UPFC(UPFC串、并联侧均参与自由寻优)以及不含UPFC的无功优化计算,2种情况下优化后的有功网损率如图6(a)所示。从图中可看出,UPFC参与调节后可进一步降低系统有功网损,但降损效果不太明显,这是由于有功网损是系统层面的指标,并且进行无功优化后系统中的发电机和无功补偿装置为系统提供了足够的无功补偿。24个断面中,最大可降损0.25%,最小可降损0.03%,平均可降损0.10%(均为相较于不含UPFC时的优化结果,后同)。

此外,在实际运行过程中,为了保证系统运行的安全稳定,常需对输电断面采取定功率的控制方式以平衡关键输电断面的输送功率(如在南京工程

中,存在南通道输送功率过重而北通道负载率较低的情况,因此,UPFC常采取定功率的控制方式提高北通道的输送功率,从而平衡南北通道的负载率以提高系统的供电能力)。

为验证系统有平衡输电断面输送功率需求时UPFC的优化能力,本文增加对北通道输送功率的约束,将其控制在300 MW,重新进行含UPFC和不含UPFC的无功优化(无论是含UPFC还是不含UPFC,在优化过程中均保持北通道的输送功率为300 MW,UPFC的并联侧参与自由寻优),2种情况下系统的网损情况如图6(b)所示。从图中可以看出,若被控支路优化后的初始有功功率(即不对北通道潮流进行约束时无功优化后的线路功率)与控制值相近(如图6(b)中断面1—4),则系统无需为维持被控支路功率恒定进行过多的额外调整,因此,UPFC参与调节后降损效果不太明显,平均可降损0.10%左右。而当被控支路优化后的初始有功功率与控制值相差较大(如图6(b)中断面5—24)时,为维持被控支路的功率恒定,系统需进行大量额外调整,使得有功网损升高。此时,UPFC参与调节可有效避免该部分调整,从而显著降低系统运行时的有功网损,平均可降损8.63%左右。

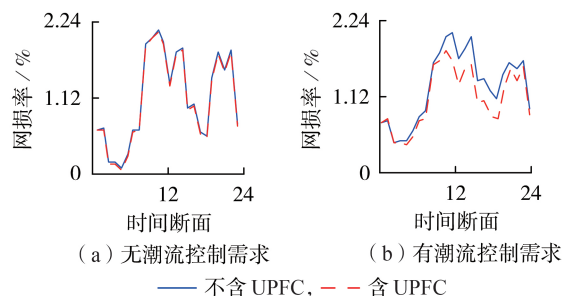


图6 优化前后系统相关运行指标对比

Fig.6 Comparison of system relevant operation indicators between before and after optimization

上述结果表明,当系统有特殊潮流控制需求时,UPFC参与调节可有效降低系统的运行损耗,这说明UPFC在无功优化领域具有较好的应用前景。

3.3 算法的适应性验证

为对算法的适应性进行验证,本文对等值后的苏州南部电网进行算例测试,等值后的苏州南部电网拥有节点195~198个,支路330~335条。图7给出了优化前后的系统有功网损对比(UPFC串、并联侧均参与自由寻优)。从图中可看出,优化后系统有功网损明显减小。24个断面中,最大可降损39.71%,最小可降损33.03%,平均可降损36.89%。电压合格率从优化前的95.95%提升到了100%。因此,本文所提算法对苏州南部电网也具有较好的优化效果,表明该算法具有较好的普适性。

针对无功优化的离散变量问题,可以采用现代

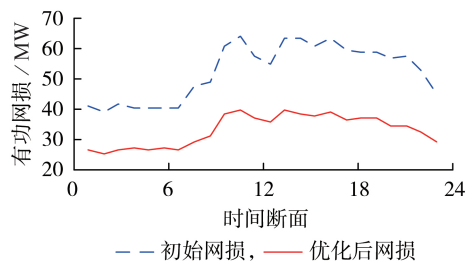


图7 苏州南部电网优化前后有功网损对比

Fig.7 Comparison of active power loss of Southern Suzhou Power Grid between before and after optimization

智能算法进行求解,如粒子群优化 PSO (Particle Swarm Optimization) 算法^[13],但该算法存在严重不足:PSO 算法中平衡点取决于粒子所经历的个体最佳位置与所有粒子经历过的最佳位置,平衡点的不断变化维持 PSO 算法的搜索能力,但如果本身质量不佳,将会导致其他粒子过快收敛,从而使平衡点陷入停滞状态,造成早熟收敛。因此,这类算法具有不确定性和低效性,限制了其实用化。

实现对离散变量的逐步归整也可通过将二次罚函数直接嵌入原-对偶内点法^[14],但是采用二次罚函数的线性近似建立离散模型须给定一系列规则和人工调试的参数。二次罚函数引入的时机也至关重要,引入过早会影响原-对偶内点法的对数壁垒函数作用,引入过晚则会影响收敛速度,增加迭代次数,甚至导致不收敛。同时,二次罚函数中的罚因子仍需人工选取,罚因子过大或者过小都会影响算法对无功优化问题中离散变量的处理效果和全局寻优结果。本文所提算法是将无功设备动作次数这个离散变量约束还原成调节代价,在优化计算过程中保证无功设备动作次数的各项约束,且满足电网实际运行条件,无需进行人工参数设置,保证了解决这类无功优化问题的实用性。

文献[19]将无功设备动作次数约束以调整代价的形式引入目标函数中,但无功设备的动作次数是非负值,因此其目标函数中涉及绝对值符号下的数值,这增加了模型的复杂程度以及求解难度。而本文所提算法利用松弛方法,通过引入非负中间变量对绝对值变量进行代换。为满足连续可导性、降低模型的求解难度,增加了松弛后的约束条件,增加的极小数为 M ,该松弛条件的加入保证了其中 1 个非负中间变量数值趋近于 0,满足模型的需求。因此本文所提模型与松弛方法既可以解决非线性规划中的离散变量问题,也可以解决因非负变量所引入的绝对值问题,算例分析验证了本文所提方法的准确性和快速性。

4 结论

本文建立和推导含 UPFC 的多端注入功率模

型,并将无功设备动作次数约束还原成经济性考量对有功网损最小的目标函数进行修正。针对绝对值项提出一种松弛模型,并提出一种基于原-对偶内点法的两阶段优化模型。通过对南京西环网等值系统的算例测试,可以得到以下结论。

(1) 本文所提算法能有效减少无功设备的动作次数得益于其时段间解耦的特性,相较于传统无功优化具有更广泛的应用范围。该算法在保证所得控制策略经济性的同时,具有较高的求解效率,能够满足无功优化问题对经济性和求解效率的需求。

(2) UPFC 参与调节后能够进一步减少系统运行的有功损耗,尤其当系统有特殊潮流控制需求时,UPFC 的优化效果更加明显,因此,其在无功优化领域具有一定的应用前景。

未来可进一步研究 UPFC 在考虑动态安全约束的无功优化问题方面的应用,进一步挖掘 UPFC 的调控潜力。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 高雯曼,任建文,申旭辉,等. 基于断面负载均衡度的统一潮流控制器潮流优化控制方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(24):79-85.
GAO Wenman,REN Jianwen,SHEN Xuhui,et al. Control method of power flow optimization for unified power flow controller based on section load balance degree[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(24):79-85.
- [2] 何天雨,石睿智,张泽,等. 含统一潮流控制器的拟线性化动态最优潮流[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):85-91,99.
HE Tianyu,SHI Ruizhi,ZHANG Ze,et al. Quasi-linearized dynamic optimal power flow with unified power flow controller[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(11):85-91,99.
- [3] 阎博,江道灼,吴兆麟,等. 具有短路限流功能的统一潮流控制器设计[J]. 电力系统自动化,2012,36(4):69-73.
YAN Bo,JIANG Daozhuo,WU Zhaolin,et al. Design of unified power flow controller with fault current limiting[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(4):69-73.
- [4] 王琦,易俊,刘丽平,等. 基于直流侧储能的新型统一潮流控制器优化设计[J]. 中国电机工程学报,2015,35(17):4371-4378.
WANG Qi,YI Jun,LIU Liping,et al. Optimal design of a novel unified power flow controller incorporated with a battery energy storage system at DC side[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(17):4371-4378.
- [5] 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.
- [6] 黄方能,黄成军,陈陈,等. UPFC 稳定控制器的研究及应用[J]. 电力自动化设备,2009,29(3):101-105.
HUANG Fangneng,HUANG Chengjun,CHEN Chen,et al. Study and application of UPFC stabilizer[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(3):101-105.
- [7] 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 method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 92-99.
- [8] ZHANG X P, HANDSCHIN E, YAO M. Modeling of the Generalized Unified Power Flow Controller(GUPFC) in a nonlinear interior point OPF[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(3): 367-373.
- [9] 卢艺, 戴月, 马伟哲, 等. 含分布式电源和储能装置的配电网分散式动态最优潮流[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 434-442.
- LU Yi, DAI Yue, MA Weizhe, et al. Decentralized dynamic optimal power flow in distribution networks with distributed generation and energy storage devices[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 434-442.
- [10] 蒲天骄, 陈乃仕, 王晓辉, 等. 主动配电网多源协同优化调度架构分析及应用设计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 17-23, 32.
- PU Tianjiao, CHEN Naishi, WANG Xiaohui, et al. Application and architecture of multi-source coordinated optimal dispatch for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 17-23, 32.
- [11] 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. Power system reactive power optimization considering UPFC installation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 37-41.
- [12] WU W C, TIAN Z, ZHANG B M. An exact linearization method for OLTC of transformer in branch flow model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2475-2476.
- [13] 刘述奎, 李奇, 陈维荣, 等. 改进粒子群优化算法在电力系统多目标无功优化中应用[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(11): 31-36.
- LIU Shukui, LI Qi, CHEN Weirong, et al. Multiobjective reactive power optimization based on modified particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(11): 31-36.
- [14] 程莹, 刘明波. 含离散控制变量的大规模电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 54-60.
- CHENG Ying, LIU Mingbo. Reactive-power optimization of large-scale power systems with discrete control variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 54-60.
- [15] 李志刚, 吴文传, 张伯明, 等. 一种基于高斯罚函数的大规模无功优化离散变量处理方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 68-76.
- LI Zhigang, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A large-scale reactive power optimization method based on Gaussian penalty function with discrete control variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 68-76.
- [16] 刘公博, 颜文涛, 张文斌, 等. 含分布式电源的配电网动态无功优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 49-54.
- LIU Gongbo, YAN Wentao, ZHANG Wenbin, et al. Optimization and dispatching method of dynamic reactive power in distribution network with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 49-54.
- [17] 丁涛, 郭庆来, 柏瑞, 等. 松弛MPEC和MIQP的启发-校正两阶段动态无功优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2100-2107.
- DING Tao, GUO Qinglai, BAI Rui, et al. Two-stage heuristic-correction for dynamic reactive power optimization based on relaxation-MPEC and MIQP[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2100-2107.
- [18] 孙田, 邹鹏, 杨知方, 等. 动态无功优化的多阶段求解方法[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1804-1810.
- SUN Tian, ZOU Peng, YANG Zhifang, et al. A multi-stage solution approach for dynamic reactive power optimization[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1804-1810.
- [19] 张勇军, 任震. 电力系统动态无功优化调度的调节代价[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 34-38.
- ZHANG Yongjun, REN Zhen. Readjusting cost of dynamic optimal reactive power dispatch of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(2): 34-38.
- [20] 李彩华, 郭志忠, 樊爱军. 原-对偶内点法最优潮流在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(8): 4-7.
- LI Caihua, GUO Zhizhong, FAN Aijun. Application of primal-dual interior point method of optimal power flow to power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(8): 4-7.

作者简介:



赵静波

赵静波(1982—),男,重庆人,高级工程师,硕士,通信作者,主要研究方向为大电网稳定分析与控制(E-mail: 1418412034@qq.com);

卫志农(1962—),男,江苏南京人,教授,博士,主要研究方向为电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化(E-mail: wzn_nj@263.net)。

(编辑 王锦秀)

Reactive power optimization algorithm considering device action times and UPFC

ZHAO Jingbo¹, WEI Zhinong², ZHU Zirong², MENG Xia¹

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: UPFC(Unified Power Flow Controller) provides a novel control means for reactive power optimization of power system. Aiming at the novel topology in practical engineering, a multi-terminal injection power model and power equations of UPFC are established. Based on the idea that transferring the action times constraint of reactive power devices into adjustment cost, a primal-dual interior point method based two-stage reactive power optimization algorithm is proposed, which only contains continuous variables. The case test results of equivalent system of Western Nanjing Ring Network show that the proposed algorithm has high calculation accuracy and solving efficiency, and it can effectively reduce the action times of reactive power devices.

Key words: unified power flow controller; reactive power optimization; primal-dual interior point method; two-stage optimization

附录：

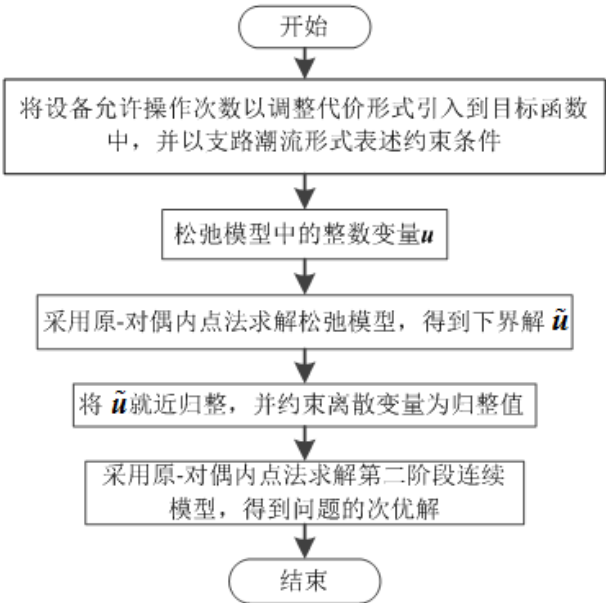


图 A1 两阶段优化方法的求解流程图
Fig.A1 Solving flowchart of two-stage optimization method

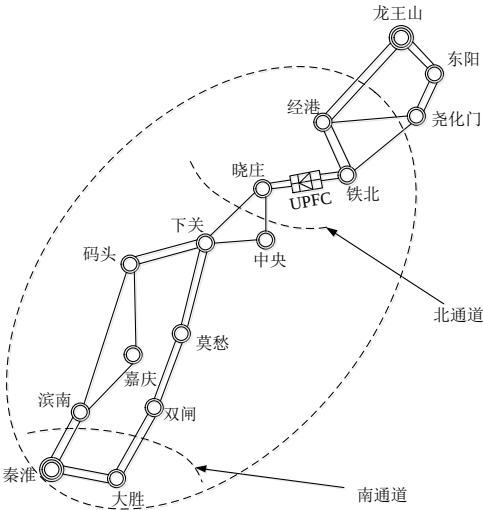


图 A2 UPFC 接入点附近拓扑示意图
Fig.A2 Schematic diagram of topology near UPFC access point

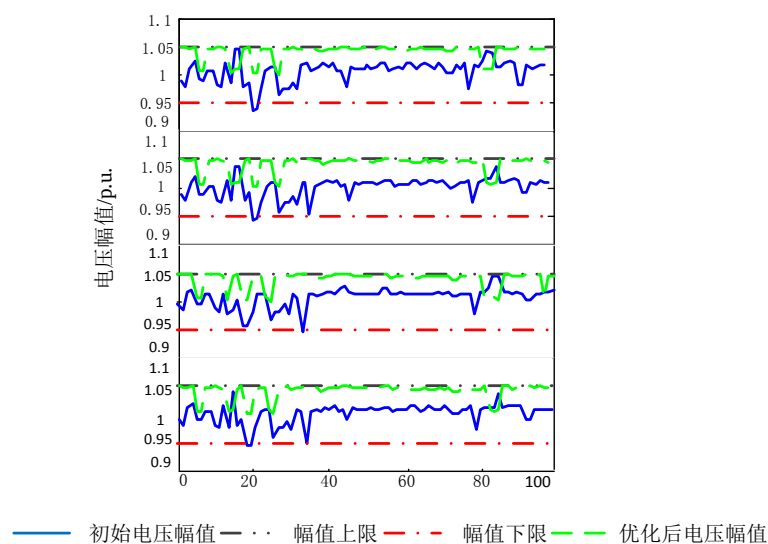


图 A3 优化前后电压幅值对比图

Fig.A3 Comparison of voltage amplitude between before and after optimization

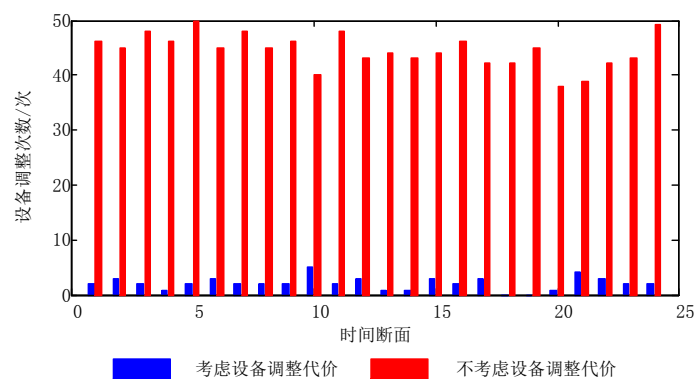


图 A4 考虑设备调整代价前后的设备调整次数对比

Fig.A4 Comparison of adjustment times between before and after considering equipment adjustment cost