

含统一潮流控制器的拟线性化动态最优潮流

何天雨¹, 石睿智¹, 张 泽¹, 耿亚明², 王 锐¹, 臧海祥³

(1. 国网江苏省电力有限公司泰州供电公司, 江苏 泰州 225300;

2. 国网江苏省电力有限公司检修分公司泰州运维站, 江苏 泰州 225300;

3. 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)具有强大的潮流控制能力,但是目前工程中的控制策略仅停留在控制站层面;含UPFC的动态最优潮流计算可以有效提高电网的安全性和经济性,但是其计算效率低、收敛性差,难以满足电网实时性要求。基于此,通过解耦、代换、热启动和迭代更新4个步骤,提出对初值不敏感的线性化动态最优潮流模型,并研究拟线性化的UPFC模型,最终建立含UPFC的拟线性化动态最优潮流模型。基于等值原理,从地区电网数据中提取南京西环网117节点等值系统,采用简化原对偶内点法对其进行求解测试,算例结果表明所建模型具有较高的计算效率和计算精度。

关键词:统一潮流控制器;动态最优潮流;拟线性化;等值系统

中图分类号:TM 711

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.11.013

0 引言

统一潮流控制器UPFC(Unified Power Flow Controller)通过控制方式的转换能够同时具有电压调节、串联补偿和移相等多种控制能力,可以快速、灵活地同时独立控制线路有功功率和无功功率^[1-4]。南京220 kV西环网UPFC示范工程是我国第一个UPFC工程,其有效解决了电网中潮流分布不均、供电瓶颈等问题,南京西环网的供电能力、安全性得到明显提高,但是目前UPFC的控制仅停留在控制站层面,还不能在系统层与电网常规控制手段共同参与电网优化^[5-6]。

最优潮流OPF(Optimal Power Flow)通过调整系统中的控制变量,可以使得潮流状态满足实际电力系统中各种安全类约束,同时使得某一经济指标达到最优,可以兼顾电力系统的安全性和经济性。动态最优潮流DOPF(Dynamic Optimal Power Flow)则是OPF在时间尺度上的扩展,能够使得调度周期内多时间断面的某一经济指标达到最优^[7]。DOPF考虑了时段间的负荷变化和变量耦合,理论上更具研究意义,但是DOPF增加了问题规模,求解效率和收敛性面临巨大的挑战^[8]。

近年来,国内外学者在电网潮流优化以及UPFC控制方面展开了大量研究。文献[9]结合电力系统特性,提出一种基于稀疏技术的原对偶内点法求解OPF问题。文献[10]研究一种可以提高求解效率的网损等值负荷模型,并将其应用到OPF领域,具有较高的计算精度。文献[11]对目前较热门的8种

UPFC的稳态模型进行分析,对每种模型应用于潮流计算中的公式进行推导,并比较分析了各模型的优缺点和适用场景。文献[12]基于UPFC的功率注入稳态模型,建立含UPFC的OPF模型,并分析不同负荷特性下UPFC的控制效果。文献[13]基于直流原理研究直流化的UPFC稳态模型,并建立含UPFC的直流OPF模型,求解效率大幅提高,但是计算精度较低。文献[14]研究热启动环境下含UPFC的线性化OPF模型,但是该模型并未拓展到动态领域,且需要依赖于一个良好的初值,适用性相对较差。

综上所述,一方面目前静态层面的含UPFC的潮流优化计算效率较差,且尚未应用到DOPF领域;另一方面优化模型的线性化研究工作尚在起步阶段。基于此,本文通过解耦、代换、热启动和迭代更新4个步骤对OPF模型进行线性化处理;将其拓展到多时段,得到线性化动态最优潮流LDOPF(Linear Dynamic Optimal Power Flow)模型,迭代过程中克服热启动模型需要依赖于初值的弊端;研究UPFC的无损嵌入式电流源模型,建立含UPFC的拟线性化动态最优潮流QLDOPF(Quasi-Linearized Dynamic Optimal Power Flow)模型。通过对南京西环网117节点等值系统进行测试,验证了本文所建模型的适用性和高效性。

1 新型 QLDOPF 模型

1.1 交流 DOPF 模型

交流DOPF的数学模型主要包括目标函数、等式约束和不等式约束。本文目标函数选择系统网损最小,具体如下:

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n_g} (P_{Gi,t} \Delta t) - \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n_b} (P_{Di,t} \Delta t) \quad (1)$$

收稿日期:2017-08-30;修回日期:2018-08-07

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2015M571653)

Project supported by China Postdoctoral Science Foundation (2015M571653)

其中, $P_{Gi,t}$ 为第 i 台发电机在时段 t 的有功出力; $P_{Di,t}$ 为节点 i 在时段 t 的有功负荷; n_g 为接入系统的发电机数; n_b 为系统节点数; T 为时段数, 由于本文中取 $T=24$, 因此每个时段间隔 $\Delta t=1$ h。

等式约束主要为各时段内节点的功率平衡约束, 具体如下:

$$\begin{cases} P_{Gi,t} - P_{Di,t} - V_{i,t} \sum_{j=1}^{n_b} [V_{j,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t})] = 0 \\ Q_{Gi,t} - Q_{Di,t} - V_{i,t} \sum_{j=1}^{n_b} [V_{j,t} (G_{ij} \sin \theta_{ij,t} - B_{ij} \cos \theta_{ij,t})] = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $Q_{Gi,t}$ 为第 i 台发电机在时段 t 的无功出力; $Q_{Di,t}$ 为节点 i 在时段 t 的无功负荷; $V_{i,t}$ 为节点 i 在时段 t 的电压相量的幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵中第 i 行第 j 列元素的实部和虚部; $\theta_{ij,t}$ 为线路两端节点 i 和节点 j 在时段 t 的相角。

不等式约束主要包括静态和动态不等式约束。静态不等式约束主要有各时段的有功和无功电源出力约束、节点电压幅值和相角约束以及线路传输功率约束, 具体如下:

$$\begin{cases} P_{Gimin} \leq P_{Gi,t} \leq P_{Gimax} & i=1, 2, \dots, n_g \\ Q_{Gimin} \leq Q_{Gi,t} \leq Q_{Gimax} & i=1, 2, \dots, n_g \\ V_{imin} \leq V_{i,t} \leq V_{imax} & i=1, 2, \dots, n_b \\ \theta_{imin} \leq \theta_{i,t} \leq \theta_{imax} & i=1, 2, \dots, n_b \\ P_{ij,t} \leq P_{ijmax} \end{cases} \quad (3)$$

其中, P_{Gimin} 、 P_{Gimax} 分别为第 i 台发电机所发有功功率的下、上限; Q_{Gimin} 、 Q_{Gimax} 分别为第 i 台发电机所发无功功率的下、上限; V_{imin} 、 V_{imax} 分别为节点电压幅值的下、上限; θ_{imin} 、 θ_{imax} 分别为节点电压相角的下、上限; P_{ijmax} 为线路有功功率上限; $P_{ij,t}$ 为线路 ij 在时段 t 传输的有功功率。

动态不等式约束选用发电机爬坡速率约束, 具体如下:

$$-R_{downi} \leq P_{Gi,t} - P_{Gi,t-1} \leq R_{up i} \quad t=2, 3, \dots, T \quad (4)$$

其中, $R_{up i}$ 、 $R_{down i}$ 分别为第 i 台发电机最大向上增出力速率和最大向下减出力速率。

综上所述可以看出, 传统 DOPF 模型具有强非线性, 因此其求解效率和收敛性面临巨大挑战, 而其中的非线性主要体现在式(2)中的节点功率潮流约束和式(3)中的线路有功功率传输容量约束。因此, 下文主要在这两方面进行线性化处理。

1.2 线性化处理方法

线性化处理方法主要分了解耦、代换、热启动和迭代更新 4 个步骤, 为了方便叙述, 本文首先在静态单断面对其原理进行介绍, 然后将其拓展到

DOPF 中。

1.2.1 解耦

首先将节点功率平衡方程解耦成线路功率流和损耗流两部分。

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{l \in i}^{n_l} (A_{il} P_{il}) - \sum_{l \in i}^{n_l} (A_{iloss} P_l^{loss}) \\ \Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{l \in i}^{n_l} (A_{il} Q_{il}) - \sum_{l \in i}^{n_l} (A_{iloss} Q_l^{loss}) \end{cases} \quad (5)$$

其中, n_l 为系统中的支路数; P_{il} 、 Q_{il} 分别为线路 l 首端的有功、无功功率流; P_l^{loss} 、 Q_l^{loss} 分别为线路 l 的有功、无功损耗; A_{il} 为线路功率流关联矩阵, 阶数为 $n_b \times n_l$, 若节点 i 为线路首端节点, 则对应元素为 1, 若节点 i 为线路末端节点, 则对应元素为 -1, 否则为 0; A_{iloss} 为线路损耗关联矩阵, 若节点 i 为线路末端节点, 则对应元素为 1, 否则为 0; $l \in i$ 表示与节点 i 相连的线路。

1.2.2 代换

设 i 、 j 分别为线路 l 的首、末端节点, 忽略节点对地导纳, 则式(5)中线路两端的潮流公式如下:

$$\begin{cases} P_{il} = g_{ij} V_i^2 - g_{ij} V_i V_j \cos \theta_{ij} - b_{ij} V_i V_j \sin \theta_{ij} \\ Q_{il} = -b_{ij} V_i^2 - g_{ij} V_i V_j \sin \theta_{ij} + b_{ij} V_i V_j \cos \theta_{ij} \\ P_{jl} = -g_{ij} V_j^2 + g_{ij} V_i V_j \cos \theta_{ij} - b_{ij} V_i V_j \sin \theta_{ij} \\ Q_{jl} = b_{ij} V_j^2 - g_{ij} V_i V_j \sin \theta_{ij} - b_{ij} V_i V_j \cos \theta_{ij} \end{cases} \quad (6)$$

其中, P_{jl} 、 Q_{jl} 分别为线路 l 末端的有功、无功功率流; g_{ij} 、 b_{ij} 分别为线路 l 的电导、电纳, 且其与导纳矩阵中对应元素的代数关系如下 $g_{ij} = -G_{ij}$, $b_{ij} = -B_{ij}$ 。

在电力系统直流潮流计算中, 根据实际电网情况, 线路两端的参数可进行以下近似: $V_i \approx V_j \approx 1$ p.u., $\sin \theta_{ij} \approx \theta_{ij}$, $\cos \theta_{ij} \approx 1$ 。由于直流模型是基于上述 3 个假设进行全局简化, 因此计算精度相对较低, 且无法求解电压幅值和无功功率。本文借鉴直流模型的求解思路, 对模型中的小部分进行简化, 因此可以假设式(6)中的正弦分量为:

$$V_i V_j \sin \theta_{ij} \approx \theta_{ij} = \theta_i - \theta_j \quad (7)$$

线路有功、无功损耗可以表示为:

$$\begin{cases} P_l^{loss} = P_{il} - P_{jl} \\ Q_l^{loss} = Q_{il} - Q_{jl} \end{cases} \quad (8)$$

若将式(6)代入式(8), 则可得到:

$$\begin{cases} P_l^{loss} = g_{ij} (V_i^2 + V_j^2) - 2g_{ij} V_i V_j \cos \theta_{ij} \\ Q_l^{loss} = -b_{ij} (V_i^2 + V_j^2) + 2b_{ij} V_i V_j \cos \theta_{ij} \end{cases} \quad (9)$$

对式(9)进行变形可得:

$$\begin{cases} V_i V_j \cos \theta_{ij} = \frac{1}{2} (V_i^2 + V_j^2) - \frac{1}{2g_{ij}} P_l^{loss} \\ V_i V_j \cos \theta_{ij} = \frac{1}{2} (V_i^2 + V_j^2) + \frac{1}{2b_{ij}} Q_l^{loss} \end{cases} \quad (10)$$

再将式(10)分别代入式(6)中 P_{il} 、 Q_{il} 的计算公式可得:

$$\begin{cases} P_{il} = \frac{1}{2} g_{ij} (V_i^2 - V_j^2) + \frac{1}{2} P_l^{\text{loss}} - b_{ij} \theta_{ij} \\ Q_{il} = -\frac{1}{2} b_{ij} (V_i^2 - V_j^2) + \frac{1}{2} Q_l^{\text{loss}} - g_{ij} \theta_{ij} \end{cases} \quad (11)$$

经过上述变换,则可将线路损耗部分代入线路功率流的计算公式中,但是其中仍然存在 V_i^2 、 P_l^{loss} 和 Q_l^{loss} 这些非线性项。 P_l^{loss} 、 Q_l^{loss} 的计算公式如下:

$$\begin{cases} P_l^{\text{loss}} = \frac{P_{il}^2 + Q_{il}^2}{V_i^2} r_{ij} \\ Q_l^{\text{loss}} = \frac{P_{il}^2 + Q_{il}^2}{V_i^2} x_{ij} \end{cases} \quad (12)$$

其中, r_{ij} 、 x_{ij} 分别为线路 l 的电阻和电抗。

1.2.3 热启动

热启动是指采用电力系统日内调度的前一断面的历史数据或者现行断面的潮流数据作为初值。基于热启动的模型精度与断面选取息息相关。

本文基于热启动环境,可以进行简单潮流计算或者直接从调度系统中获取当前断面的电压值 V_{i0} 和线路功率流值 P_{i0} 、 Q_{i0} ,采用泰勒级数展开的方法,取其一阶项,并忽略截断误差,进而可将代换过程中残存的非线性项进行如下线性化:

$$V_i^2 = V_{i0}^2 + 2V_{i0}(V_i - V_{i0}) \quad (13)$$

$$P_l^{\text{loss}} = P_{l0}^{\text{loss}} + r_{ij} \left[\frac{2P_{i0}}{V_{i0}^2} \frac{2Q_{i0}}{V_{i0}^2} - 2 \frac{P_{i0}^2 + Q_{i0}^2}{V_{i0}^3} \right] \begin{bmatrix} P_{il} \\ Q_{il} \\ V_i \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$Q_l^{\text{loss}} = Q_{l0}^{\text{loss}} + x_{ij} \left[\frac{2P_{i0}}{V_{i0}^2} \frac{2Q_{i0}}{V_{i0}^2} - 2 \frac{P_{i0}^2 + Q_{i0}^2}{V_{i0}^3} \right] \begin{bmatrix} P_{il} \\ Q_{il} \\ V_i \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中, P_{l0}^{loss} 、 Q_{l0}^{loss} 分别为直接获取的或者根据当前断面潮流数据计算的线路 l 的有功、无功损耗初值。

将式(13)~(15)代入式(11),并将等号右侧涉及的 P_{il} 、 Q_{il} 项移到等号左侧,合并,然后单位化,可得:

$$\begin{cases} P_{il} = m_1 V_i + m_2 V_j + m_3 \theta_i + m_4 \theta_j + m_{P_l} \\ Q_{il} = m_5 V_i + m_6 V_j + m_7 \theta_i + m_8 \theta_j + m_{Q_l} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} P_l^{\text{loss}} = m_9 V_i + m_{10} V_j + m_{11} \theta_i + m_{12} \theta_j + m_{P_{\text{loss}}} \\ Q_l^{\text{loss}} = m_{13} V_i + m_{14} V_j + m_{15} \theta_i + m_{16} \theta_j + m_{Q_{\text{loss}}} \end{cases} \quad (17)$$

其中, m_1 — m_{16} 、 m_{P_l} 、 m_{Q_l} 、 $m_{P_{\text{loss}}}$ 、 $m_{Q_{\text{loss}}}$ 为进行变换处理后的系数,具体推导不再赘述。

1.2.4 迭代更新

文献[14]最先在 OPF 领域进行该模型适用性研究,但是其只含有解耦、代换、热启动 3 个步骤,仅

获取一次初值并应用于整个迭代过程中,这使得计算精度对初值选取较敏感。若将该模型运用到 DOPF 领域中,由于不同断面间的潮流状态变化大,模型精度将变差。因此,本文对文献[14]的模型进行改进,增加了迭代更新环节,相关公式如下:

$$\begin{cases} V_{i0_{n+1}} = V_{i_n} \\ P_{i0_{n+1}} = P_{i0_n} \\ Q_{i0_{n+1}} = Q_{i0_n} \end{cases} \quad (18)$$

其中, V_{i_n} 、 P_{i0_n} 、 Q_{i0_n} 分别为第 n 次迭代后计算所得电压值和线路有功、无功功率; $V_{i0_{n+1}}$ 、 $P_{i0_{n+1}}$ 、 $Q_{i0_{n+1}}$ 为第 $n+1$ 迭代的线性化处理所需要的初值。

迭代更新环节解决了文献[14]中模型精度对初值的依赖性。至此,本文将复杂的静态单断面下的非线性 OPF 模型转化为线性模型。

1.3 LDOPF 模型

将 1.2 节中单断面的线性化处理进行断面拓展,便可以得到 LDOPF 模型。此时,LDOPF 模型的目标函数同式(1),等式约束变为:

$$\begin{cases} \Delta P_{i,t} = P_{Gi,t} - P_{Di,t} - \sum_{l \in i}^{n_l} (A_{il} P_{il,t}) - \sum_{l \in i}^{n_l} (A_{iloss} P_{l,t}^{\text{loss}}) \\ \Delta Q_{i,t} = Q_{Gi,t} - Q_{Di,t} - \sum_{l \in i}^{n_l} (A_{il} Q_{il,t}) - \sum_{l \in i}^{n_l} (A_{iloss} Q_{l,t}^{\text{loss}}) \end{cases} \quad (19)$$

其中, $P_{il,t}$ 、 $P_{l,t}^{\text{loss}}$ 、 $Q_{il,t}$ 、 $Q_{l,t}^{\text{loss}}$ 为在静态变量的基础上拓展到多时段后对应的变量。

基于上述线性化处理思想,LDOPF 不等式约束中的线性约束同式(3),唯一的非线性约束即线路有功功率约束变为:

$$|P_{il,t}| \leq P_{ij\max} \quad (20)$$

2 拟线性化的 UPFC 无损嵌入式模型

2.1 UPFC 无损嵌入式电流源模型

UPFC 的挂网运行使得网络结构更加复杂,若选择具有强非线性的 UPFC 稳态模型进行 DOPF 计算,收敛难度将更大。因此,本文研究原理简单的 UPFC 无损嵌入式电流源模型,该模型忽略了 UPFC 串、并联侧和所在线路电阻,将 UPFC 串、并联侧对所在线路潮流的影响等效成 3 个电流源,并更新所在线路电纳,形成计及 UPFC 参数的等值电纳,具体模型如图 1 所示。

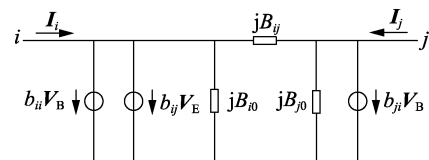


图 1 UPFC 无损嵌入式电流源模型

Fig.1 UPFC lossless embedded current source model

图 1 中, V_B 、 V_E 分别为 UPFC 串、并联侧电压, I_i 、 I_j 为两端注入电流, B_{ij} 、 B_{i0} 、 B_{j0} 、 b_{ii} 、 b_{ij} 、 b_{ji} 可表示为:

$$\begin{cases} B_{ij} = \frac{X_C}{X_M}, B_{i0} = -\frac{1}{X_E} + \frac{X_L}{X_M}, B_{j0} = \frac{1}{X_C} + \frac{X_B}{X_M} \\ b_{ii} = j \frac{X_L - X_C}{X_M}, b_{ij} = j \frac{1}{X_E}, b_{ji} = j \frac{X_C}{X_M} \end{cases} \quad (21)$$

其中, $X_M = X_L X_C + X_B X_C - X_B X_L$, X_L 、 X_C 分别为 UPFC 所装位置的原始线路电抗、对地电抗; X_B 、 X_E 分别为 UPFC 串、并联侧电抗。

2.2 拟线性化 UPFC 等效模型

将 UPFC 对线路的潮流作用以复功率形式表示, 如图 2 所示。

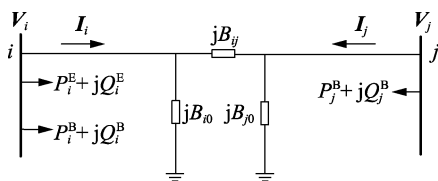


图 2 UPFC 无损嵌入式复功率源模型

Fig.2 UPFC lossless embedded complex power source model

图 2 将复杂的 UPFC 线路处理成 π 型模型, UPFC 参数与线路参数耦合成新的电纳参数, 代替 UPFC 潮流控制作用的复功率源的计算公式如下:

$$\begin{cases} P_i^B = V_i V_B \sin(\theta_i - \theta_B) \frac{X_L - X_C}{X_M} \\ Q_i^B = -V_i V_B \cos(\theta_i - \theta_B) \frac{X_L - X_C}{X_M} \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} P_i^E = V_i V_E \sin(\theta_i - \theta_E) \frac{1}{X_E} \\ Q_i^E = -V_i V_E \cos(\theta_i - \theta_E) \frac{1}{X_E} \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} P_j^B = V_j V_B \sin(\theta_j - \theta_B) \frac{X_C}{X_M} \\ Q_j^B = -V_j V_B \cos(\theta_j - \theta_B) \frac{X_C}{X_M} \end{cases} \quad (24)$$

其中, P_i^B 、 Q_i^B 分别为 UPFC 串联电压源在节点 i 的等效注入有功、无功功率; P_i^E 、 Q_i^E 分别为 UPFC 并联电压源在节点 i 的等效注入有功、无功功率; P_j^B 、 Q_j^B 分别为 UPFC 串联电压源在节点 j 的等效注入有功、无功功率; θ_B 、 θ_E 分别为 UPFC 串、并联电压源的电压相角。

UPFC 无损模型内部还需要满足有功守恒, 即 UPFC 既不发出有功功率也不吸收有功功率, 如式 (25) 所示。

$$P_{UPFC}^B - P_{UPFC}^E = 0 \quad (25)$$

UPFC 的串、并联侧的有功功率可分别表示为:

$$P_{UPFC}^B = -V_i V_B \sin(\theta_i - \theta_B) \frac{X_L - X_C}{X_M} - V_j V_B \sin(\theta_j - \theta_B) \frac{X_C}{X_M} \quad (26)$$

$$P_{UPFC}^E = V_i V_E \sin(\theta_i - \theta_E) \frac{1}{X_E} \quad (27)$$

根据 1.2 节的线性化处理技术的思想, 假设式 (22)~(24)、(26)、(27) 中的 $V_i \approx V_j \approx 1$ p.u., 这样可以进一步降低模型的复杂度。至此, 有关 UPFC 的稳态模型已经处理完毕, 但是其中仍然存在部分非线性二次项和三角函数项, 严格意义上并没有做到完全线性化, 模型化简并不完美, 因此本文定义其为拟 (近似) 线性化 UPFC 稳态模型。但是, 该模型一方面比文献 [13] 中基于直流原理的完全线性化 UPFC 模型的计算精度更高, 更完善地保留了 UPFC 的控制性能; 另一方面比常用的 UPFC 功率注入模型和独立支路模型更简单, 对算法收敛性能影响更小, 更便于与本文完全线性化的 DOPF 模型融合。此外, 由于 UPFC 造价昂贵, 通常只安装在存在重载情况的重要联络线上, 以南京西环网为例, UPFC 装置在系统中的数量较少, 因此该 UPFC 模型中残存的非线性因素并不会给已完全线性化的主框架 DOPF 模型带来较大的计算负担。

3 含 UPFC 的 QLDOPF 模型及求解

3.1 含 UPFC 的 QLDOPF 模型

含 UPFC 的 QLDOPF 模型同样包括目标函数、等式约束和不等式约束三部分。

a. 目标函数同式 (1)。

b. 等式约束。

由于嵌入式稳态模型将 UPFC 对系统潮流的影响处理成直接并联在线路两端的等效功率源形式, 因此只需要对 UPFC 安装线路的首、末端节点的功率平衡方程做部分修改, 具体如下:

$$\Delta P_{i,t} = P_{Gi,t} - P_{Di,t} - P_{i,t}^B - P_{i,t}^E - \sum_{l \in i}^{n_l} (A_{il} P_{il,t}) - \sum_{l \in i}^{n_l} (A_{iloss} P_{l,t}^{loss}) \quad (28)$$

$$\Delta Q_{i,t} = Q_{Gi,t} - Q_{Di,t} - Q_{i,t}^B - Q_{i,t}^E - \sum_{l \in i}^{n_l} (A_{il} Q_{il,t}) - \sum_{l \in i}^{n_l} (A_{iloss} Q_{l,t}^{loss}) \quad (29)$$

$$\Delta P_{j,t} = P_{Gj,t} - P_{Dj,t} - P_{j,t}^B - \sum_{l \in j}^{n_l} (A_{jl} P_{jl,t}) - \sum_{l \in j}^{n_l} (A_{jloss} P_{l,t}^{loss}) \quad (30)$$

$$\Delta Q_{j,t} = Q_{Gj,t} - Q_{Dj,t} - Q_{j,t}^B - \sum_{l \in j}^{n_l} (A_{jl} Q_{jl,t}) - \sum_{l \in j}^{n_l} (A_{jloss} Q_{l,t}^{loss}) \quad (31)$$

除此之外,等式约束还要增加 UPFC 的内部有功功率平衡约束即式(25)。

如果设定 UPFC 控制线路末端潮流和并联安装处电压,则还需增加等式约束如下:

$$P_{jl,t} = P_{\text{set}}, Q_{jl,t} = Q_{\text{set}}, V_{i,t} = V_{\text{set}} \quad (32)$$

其中, $P_{ji,t}$ 、 $Q_{ji,t}$ 分别线路末端在时段 t 的有功、无功功率; $V_{i,t}$ 为 UPFC 并联在节点 i 上在时段 t 的电压; P_{set} 、 Q_{set} 、 V_{set} 为对应的设定值。

电网中通常将设备或线路的有功功率超过传输极限的 75% 定义为重载情况。所谓 UPFC 的消重载作用,是将 UPFC 的 P_{set} 、 Q_{set} 分别设置为 $P_{ij\text{max}}$ 、 $Q_{ij\text{max}}$ 的 75% 以下,然后计及等式约束式(32),即可实现 UPFC 安装位置及其附近潮流的消重载功能。设置 $V_{i,t} = V_{\text{set}}$ 还可以同时实现并联安装位置的电压调节功能。

c. 不等式约束。

不等式约束除了需要考虑 LDOPF 模型中已有的式(3)、(20)外,还要考虑 UPFC 的控制参数约束如下:

$$\begin{cases} V_{\text{Bimin}} \leq V_{\text{Bi},t} \leq V_{\text{Bimax}} & i \in \{1, 2, \dots, N_{\text{UPFC}}\} \\ V_{\text{Eimin}} \leq V_{\text{Ei},t} \leq V_{\text{Eimax}} & i \in \{1, 2, \dots, N_{\text{UPFC}}\} \\ \theta_{\text{Bimin}} \leq \theta_{\text{Bi},t} \leq \theta_{\text{Bimax}} & i \in \{1, 2, \dots, N_{\text{UPFC}}\} \\ \theta_{\text{Eimin}} \leq \theta_{\text{Ei},t} \leq \theta_{\text{Eimax}} & i \in \{1, 2, \dots, N_{\text{UPFC}}\} \end{cases} \quad (33)$$

其中, V_{Bimin} 、 V_{Eimin} 、 V_{Bimax} 、 V_{Eimax} 和 θ_{Bimin} 、 θ_{Eimin} 、 θ_{Bimax} 、 θ_{Eimax} 分别为第 i 台 UPFC 装置的串、并联侧电压幅值和相角的下、上限; N_{UPFC} 为 UPFC 数量。

3.2 模型求解

本文首先从算法角度追求模型的高效求解:采用求解效率高的简化原对偶内点法^[10];DOPF 算法的修正方程式采用解耦技术^[7];利用稀疏技术处理系统矩阵^[15]。基于内点类算法的主框架 DOPF 问题的详细求解步骤参见文献[7],本文不再赘述。

4 算例测试

4.1 算例说明

如果直接对华东区域电网数据进行优化测试,会存在以下问题:一方面存在实际调度瓶颈,而且区域电网数据量庞大,对其进行 DOPF 相关计算,给计算的实时性和收敛性带来很大的挑战;另一方面本文研究含 UPFC 的 QLDOPF,由于 UPFC 的潮流调节作用在安装位置周围比较明显,若在大电网内进行分析,将无法凸显 UPFC 的作用,结论性不强。因此,本文基于 BPA 对华东电网 2017 年夏季高峰某典型日数据进行等值,得到南京西环网 117 节点等值系统,并以每小时为 1 个时间断面,选取 24 个时段数据。

设置 UPFC 的控制方式如下。方式 1:UPFC 不

参与优化,该方式下 UPFC 相关变量不参与优化过程,UPFC 在电网中的作用就相当于阻抗和导纳。方式 2:UPFC 不设置控制参数优化,即不计及等式约束式(32),该方式下 UPFC 控制参数相关的变量(UPFC 串、并联侧电压幅值和相角)参与自由寻优。方式 3:UPFC 设置控制参数优化,即计及等式约束式(32),该方式下 UPFC 控制参数相关的变量被控制参数所限定,为定值。

4.2 算例分析

4.2.1 含 UPFC 的交流 DOPF 计算

首先对南京西环网 117 节点等值系统进行不同 UPFC 控制方式下的交流 DOPF 计算,为了保证结果的准确性,UPFC 稳态模型采用文献[12]中的功率注入模型,优化结果如表 1 所示。

表 1 基于不同 UPFC 控制方式的 DOPF 计算结果

Table 1 Calculative results of DOPF based on different UPFC control modes

控制方式	总网损/ MW	计算 时间/s	迭代 次数	电压越限 节点	重载线路 时段
方式 1	184.6	3.215	28	—	8—22
方式 2	182.5	3.987	30	—	8—22
方式 3	182.8	4.562	32	—	—

由表 1 可知,相比于 UPFC 不参与优化,UPFC 参与优化的总网损均有一定降低,说明了 UPFC 具有降损能力。UPFC 参与优化后的计算时间和迭代次数有所增加,这是因为增加了 UPFC 相关变量和约束,进而增加了计算复杂度。此外,UPFC 不参与优化和 UPFC 不设置控制参数优化 2 种方式本质上并没有发挥 UPFC 的消重载作用(因为没有计及等式约束式(32)),因此在电网负荷较重时段存在重载线路;而当 UPFC 设置控制参数优化时,则在 24 个时段都为 UPFC 设置消重载参数,从而全天性消除重载情况,但是优化结果会相对保守。

文献[16]同样采用原对偶内点法对同等规模的 IEEE 118 节点系统进行 DOPF 计算,迭代 34 次,求解时间为 300.24 s,若计及 UPFC,则求解效率将更低。本文的求解时间都在 5 s 以内,这是因为本文算法采用了 3.2 节介绍的 3 种提高求解效率的技术。

4.2.2 含 UPFC 的 QLDOPF 计算

从 4.2.1 节中可以看出,尽管已经采用等值后的小系统,并在算法层面采用多种提高计算效率的技术,但是含 UPFC 的交流 DOPF 计算依然需要较多的迭代次数和计算时间。因此,本文在模型层面建立含 UPFC 的 QLDOPF 模型,同样采用实际系统测试,各时段启动初值选择各自断面的潮流值,结果如表 2 所示。

表 2 中目标函数相对误差指的是本节模型与 4.2.1 节中表 1 计算结果的相对误差。可见相对误差

表 2 基于不同 UPFC 控制方式的 QLDOPF 计算结果

Table 2 Calculative results of QLDOPF based on different UPFC control modes

控制方式	总网损/ MW	相对 误差/%	计算 时间/s	迭代 次数	电压超限 节点	重载线路 时段
方式 1	172.5	6.55	1.023	15	—	8—22
方式 2	171.3	6.14	1.342	16	—	8—22
方式 3	171.9	5.96	1.893	16	—	—

基本保持在 7% 以内,从目标函数角度体现了线性化模型的精确性。相比于基于直流原理的线性化模型,本文模型计及了电压幅值,因此并没有削弱优化模型对电压幅值的约束能力,所有节点电压幅值都在所设的 0.95~1.05 p.u. 范围内。此外,从 UPFC 设置控制参数优化的结果来看,线性化模型并没有削弱 UPFC 的消重载能力。从计算效率上来看,相比于交流 DOPF 非线性模型,QLDOPF 模型的计算时间和迭代次数都大幅减少,其中计算时间减少 60% 以上,迭代次数减少约 50%,体现了线性化模型的高效性和良好收敛性。

表 2 中 24 个时段的总网损可能会因为正、负误差的抵消作用,使得结论过于乐观,因此图 3 将 24 个时段的网损进行展开。由于方式 3 最能体现 UPFC 的控制特性,因此只展示该方式下的结果。由图 3 可知,采用 QLDOPF 计算得到的 24 个时段网损曲线与交流 DOPF 的网损曲线基本吻合,进一步验证了线性化模型对于目标函数计算的精确性以及在不同负荷情况下的稳定性。虽然图 3 中部分时段的网损偏差达到 0.5 MW 左右,但是偏差率在 5%~7% 之间,在工程上可接受的 10% 以内。

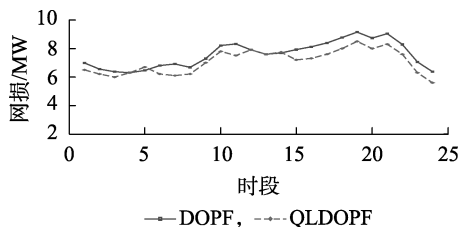


图 3 方式 3 下的网损曲线偏差图

Fig.3 Deviation of network power loss under Mode 3

除了目标函数之外,本节还对方式 3 下的采用 QLDOPF 计算得到的电压幅值精度进行分析,选择时段 1 进行展示,结果如图 4 所示(电压幅值为标么值)。可以看出,采用线性化模型计算得到的电压幅值也具有较高精度,体现了本文模型的全局性。

经过测试可知,采用该模型计算得到的线路潮流和电压相角也具有较高精度,由于篇幅所限,这里不再赘述。

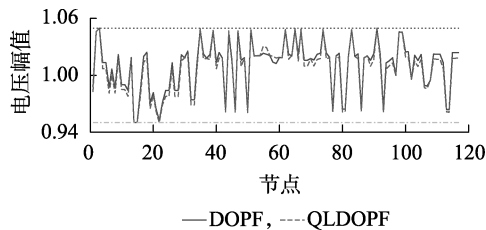


图 4 方式 3 下的电压幅值曲线偏差图

Fig.4 Deviation of voltage amplitude under Mode 3

4.2.3 初值敏感性测试

为了证明增加迭代更新环节的优势,模拟不同初值环境下本文模型和未考虑迭代的文献[14]模型的性能对比。首先将文献[14]模型拓展到 DOPF 领域,然后模拟 3 种初值启动环境。初值 1:同 4.2.2 节,各时段启动初值选择各自时段的潮流值。初值 2:各时段初值选时段 1(轻载时段)的潮流值。初值 3:各时段初值选时段 20(重载时段)的潮流值。

3 种初值下的计算结果如表 3 所示。在初值条件相对较差(如取轻载、重载时段的初值)的情况下,文献[14]算法的精度明显降低,说明其对良好初值的依赖性大,而本文算法则保持稳定且具有较高的精度,对初值选取不敏感,证明了上文理论分析的正确性。虽然迭代更新过程使得本文算法的计算时间比文献[14]有略微增加,但是相比于交流模型,依然具有较大的效率优势。

4.2.4 多算例验证测试

为了验证模型的适应性,本文还对 IEEE 30 (UPFC 安装在线路 14-15 的节点 14 侧)、IEEE 118 (UPFC 安装在线路 3-5 的节点 3 侧)、IEEE 300 (UPFC 安装在线路 13-20 的节点 13 侧)节点系统进行测试,UPFC 控制方式均选择方式 3。测试结果见表 4。可以看出,本文模型在不同的 IEEE 算例中均有着较高的稳定性,目标函数精度保持在 5% 左右,计算效率优势会随着系统规模的扩大逐渐显现,收敛性提高 50% 以上。此外,本文模型在不同的 IEEE 算例中的电压幅值、电压相角、线路潮流等方面也具有较高精度,由于篇幅所限,这里不再赘述。

表 3 基于不同初值的优化结果对比

Table 3 Comparison of optimization results based on different initial values

初值方式	总网损/MW			计算时间/s			网损相对误差/%		时间减少比/%	
	含 UPFC 的 DOPF	本文 算法	文献[14] 算法	含 UPFC 的 DOPF	本文 算法	文献[14] 算法	本文 算法	文献[14] 算法	本文 算法	文献[14] 算法
初值 1	182.8	171.9	170.2	4.562	1.893	1.712	5.96	6.89	58.51	62.47
初值 2	180.6	171.2	160.8	4.922	1.775	1.614	5.20	10.96	63.94	67.21
初值 3	186.9	178.2	165.4	5.012	1.954	1.773	4.65	11.50	61.01	64.62

表 4 不同算例下的模型性能对比

Table 4 Comparison of model performances under different cases

初值方式	总网损/MW			计算时间/s			网损相对误差/%		时间减少比/%	
	含 UPFC 的 DOPF	本文 算法	文献[14] 算法	含 UPFC 的 DOPF	本文 算法	文献[14] 算法	本文 算法	文献[14] 算法	本文 算法	文献[14] 算法
初值 1	182.8	171.9	170.2	4.562	1.893	1.712	5.96	6.89	58.51	62.47
初值 2	180.6	171.2	160.8	4.922	1.775	1.614	5.20	10.96	63.94	67.21
初值 3	186.9	178.2	165.4	5.012	1.954	1.773	4.65	11.50	61.01	64.62

5 结论

一方面,目前工程应用中的 UPFC 控制调节仅停留在控制站层面,潮流控制调节相对独立,其无法与电网常规控制手段相配合;另一方面,如果进行含 UPFC 的多时段全局优化调度,会存在模型复杂、计算速度慢、收敛难度大的问题。基于此,本文提出一种含 UPFC 的 QLDOPF 模型,对含 UPFC 的实际电网等值数据进行测试,可以得到如下结论:

a. 采用含 UPFC 的 DOPF 模型计算,并对 UPFC 设置控制参数,可以在发挥 UPFC 消重载能力的前提下,使得 UPFC 与电网常规调控手段共同参与电网多时段整体优化,达到降损目的,提高了电网的经济性;

b. 相比于传统交流模型,含 UPFC 的 QLDOPF 模型的计算效率大幅提高,在目标函数、电压幅值、电压相角、线路潮流等方面都具有较高的计算精度,并在不同负荷情况下具有较高的稳定性;

c. 增加迭代更新环节的 LDOPF 模型,虽然牺牲了一定的效率,但是进一步提高了线性化模型的精度,对初值变化不敏感,具有一定的实用意义。

为了保留 UPFC 的控制性能,本文并未做到 UPFC 模型的完全线性化,这将是本文后续的研究工作。

参考文献:

- [1] 马朋,刘青,邹家平,等. UPFC 有功控制引起的交互影响研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):176-181.
MA Peng, LIU Qing, ZOU Jiaping, et al. Research on interaction during active power-flow control of UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 176-181.
- [2] PEREIRA M, ZANETTA L C. A current based model for load flow studies with UPFC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 667-682.
- [3] 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 OPF considering wind-power uncertainty for power system with UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 80-86.
- [4] 李鹏,王玉婷,高磊,等. 统一潮流控制器串联变压器启动调试方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 68-73.
LI Peng, WANG Yuting, GAO Lei, et al. Startup test method for series transformer of UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 68-73.
- [5] 郑涛,吴丹,陆振纲,等. MMC-UPFC 不同接地设计的故障特性及对本地保护配置影响[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 54-60.
ZHENG Tao, WU Dan, LU Zhengang, et al. Impact of MMC-UPFC grounding design on fault characteristics and protection scheme[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 54-60.
- [6] 吴捷,王建. 含 UPFC 的灵活交流输电系统最优潮流控制[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(3): 1-3.
WU Jie, WANG Jian. Stochastic optimal power flow control of flexible AC transmission system with UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(3): 1-3.
- [7] XIE K, SONG Y H. Dynamic optimal power flow by interior point methods[J]. IET Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 2009, 148(1): 76-84.
- [8] GILL S, KOCKAR I, AULT G W. Dynamic optimal power flow for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 121-131.
- [9] 李彩华,郭志忠,樊爱军,等. 原对偶内点法最优潮流在电力系统中的作用[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(8): 4-7.
LI Caihua, GUO Zhizhong, FAN Aijun, et al. Application of primal-dual interior point method of optimal power flow to power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(8): 4-7.
- [10] 何天雨,卫志农,孙国强,等. 基于网损等值负荷模型的改进直流最优潮流算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(6): 58-64.
HE Tianyu, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Modified direct current optimal power flow algorithm based on net loss equivalent load model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 58-64.
- [11] KAMEL S, JURADO F, LOPES J A. Comparison of various UPFC models for power control[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 29(5): 243-251.
- [12] 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.
- [13] SUWAFFAQ I. Derivation of UPFC DC load flow model with examples of its use in restructured power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(3): 1173-1180.
- [14] 臧海洋,何天雨,刘建坤,等. 热启动环境下含统一潮流控制器的线性化最优潮流模型[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3517-3522.
ZANG Haixiang, HE Tianyu, LIU Jiankun, et al. Linear optimal power flow model with unified power flow controller in hot-start environment[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3517-3522.
- [15] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社, 2003: 11-72.
- [16] 刘方. 关于电力系统动态最优潮流的几种模型与算法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2007.

- [21] 王薪苹,李群,刘建坤,等. 计及 UPFC 的 220 kV 分区电网运行可靠性研究[J]. 电力工程技术,2017,36(1):39-42,46.
WANG Xinping, LI Qun, LIU Jiankun, et al. Operating reliability research of 220 kV divisional power grid considering UPFC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 39-42, 46.
- [22] BUKHSH W A, GROTHEY A, MCKINNON K I M, et al. Local solutions of the optimal power flow problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4780-4788.

作者简介:

朱梓荣(1994—),男,浙江温州人,硕士研究生,通信作



朱梓荣

者,主要研究方向为电力系统优化运行(E-mail:hhuzhuzirong@163.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);

赵静波(1982—),男,江苏南京人,高级工程师,硕士,主要研究方向为大电网安全稳定分析与控制、电网规划与仿真分析(E-mail:1418412034@qq.com)。

Optimal power flow with UPFC based on semi-definite programming method

ZHU Zhirong¹, WEI Zhinong¹, ZHAO Jingbo², LI Qun², WANG Dajiang², SUN Guoqiang¹, ZANG Haixiang¹

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

2. State Grid Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: The traditional OPF (Optimal Power Flow) problem is a non-convex optimization problem, and the introduction of UPFC (Unified Power Flow Controller) further increases the non-convexity degree of the OPF problem, so the traditional interior point method is unable to guarantee the global optimality of the solutions effectively. On this basis, the interior point SDP (Semi-Definite Programming) algorithm, which is insensitive to the initial value and has the ability to find the global optima, is extended to the OPF problem of power system with UPFC. The UPFC variables are added to the system state variables to form the augmented variables for optimal reorganization, and the OPF problem with UPFC is mapped into SDP space based on the quadratic form in rectangular coordinates. IEEE 30-, 57-, 118-, 300-bus systems and a practical system are tested, and the results show that the proposed algorithm effectively guarantee the global optimality of the obtained solutions, and the optimal reorganization of the augmented variables effectively improves the computational efficiency and numerical stability of the algorithm.

Key words: optimal power flow; semi-definite programming; unified power flow controller; interior point method; global optimal solution

(上接第 91 页 continued from page 91)

LIU Fang. Study on some models and methods for dynamic optimal power flow of electrical power system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.

作者简介:

何天雨(1992—),男,安徽天长人,硕士,主要研究方向为电力系统运行与分析、UPFC 并网(E-mail:hetianyu@163.com);



何天雨

163.com);

石睿智(1991—),女,江苏泰州人,工程师,主要研究方向为电力系统状态监测(E-mail:shirui@163.com);

张 泽(1978—),男,江苏宿迁人,高级工程师,主要研究方向为电网智能运检技术(E-mail:taizhouzz@163.com)。

Quasi-linearized dynamic optimal power flow with unified power flow controller

HE Tianyu¹, SHI Ruizhi¹, ZHANG Ze¹, GENG Yaming², WANG Rui¹, ZANG Haixiang³

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Taizhou Power Supply Company, Taizhou 225300, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Maintenance Branch Company Taizhou Operation and Maintenance Station, Taizhou 225300, China; 3. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: UPFC (Unified Power Flow Controller) is capable of efficient power flow controls. However, current practical control strategies are limited to the control station level. The dynamic optimal power flow with UPFC can effectively improve the security and economic of the power grid, which, however, suffers from the problems of low efficiency and poor convergence, as a result, its real-time applications in practical power grids cannot be satisfied. On this background, a linear dynamic optimal power flow model is proposed, which is insensitive to the initial value and includes four steps of decoupling, substitution, hot start and iteration. A quasi-linearized UPFC model is also studied, based on which a quasi-linearized dynamic optimal power flow model with UPFC is established. Based on the equivalent principle, a 117-bus equivalent Nanjing West Ring Network is derived from the regional power grid, and the simplified primal-dual interior point method is employed to solve the optimization problem. Test results show that the proposed model exhibits satisfactory computational efficiency and calculation accuracy.

Key words: unified power flow controller; dynamic optimal power flow; quasi-linearized; equivalent system