

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.05.020

基于改进 MCCIPM 的含 TCPST 电力系统最优潮流计算

张宁宇¹, 张恪², 李群¹, 刘建坤¹, 赵静波¹, 孙国强²

(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:随着可控移相器(TCPST)在现代电力系统中应用水平的逐渐提高,计及TCPST的系统最优潮流(OPF)计算迎来了新的挑战。文中提出了一种基于改进内点法的含TCPST电力系统OPF计算方法。首先,结合TCPST接入系统的等效功率注入模型,以系统有功网损最小为目标建立含TCPST的最优潮流模型;其次,为提高收敛速度,文中针对多中心-校正内点法(MCCIPM)进行改进,提高了仿射方向迭代步长并重新配置关键映射参数;最后,基于改进后的MCCIPM,在IEEE 14、IEEE 30和IEEE 118节点网络完成OPF计算。测试结果表明,TCPST具有控制线路潮流分布的能力,验证了文中计算方法在求解效率上的优越性。

关键词:可控移相器(TCPST);最优潮流(OPF);有功网损最小;仿射方向步长;改进多中心-校正内点法(MCCIPM)

中图分类号:TM744

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)05-0144-07

0 引言

随着经济的快速发展,我国部分地区的电网供电能力已无法满足人们日益增长的生活需求,寻找缓解此矛盾的方法是当今电网建设的首要任务^[1-5]。可控移相器(thyristor controlled phase shifting transformer, TCPST)作为新一代柔性交流输电(flexible AC transmission system, FACTS)装置,可通过调整可控元件参数实现对母线电压和线路潮流的灵活控制,并有效提高分区供电能力^[6-7],因此,TCPST具有广泛的应用前景。

系统最优潮流(optimal power flow, OPF)是电力系统优化运行领域的重要分支^[8-9],因此,研究含TCPST的电力系统OPF问题可充分发挥TCPST对线路潮流的调控能力,进而提高电网运行的安全性^[10-12]。文献[13-14]将FACTS最优参数的设定问题描述为优化问题,并通过求解OPF得到FACTS装置的可控参数值。文献[15]验证了TCPST在线路潮流灵活控制、降低系统网损方面的有效性。文献[16]对含TCPST等FACTS装置的电力系统进行最大输电能力的OPF计算,验证了TCPST提高系统运行经济的能力。文献[17]采用原对偶内点法(primal dual interior point method, PDIPM)完成含TCPST系统的OPF计算,然而在拓扑结构复杂的大系统中,PDIPM很可能出现收敛性差、甚至不收敛

情况。针对内点法求解易出现方向错误、计算效率低等问题,采用高阶算法来提高牛顿方向的多中心-校正内点法(multiple centrality-correction interior point method, MCCIPM)逐渐应用于电力系统优化计算中。文献[18]基于鲁棒性好的MCCIPM完成系统OPF计算,验证了MCCIPM对求解OPF问题的有效性。文献[19]利用MCCIPM完成可用输电能力的计算,提高了优化问题计算的收敛性。

文中首先依据TCPST工作原理获得其等效功率注入模型;其次以系统有功损耗最小为目标确定计及TCPST的OPF模型;然后针对目前MCCIPM参数设置保守、迭代计算时间长等问题,提出重新配置部分映射参数、改进MCCIPM的仿射方向迭代步长;最后,采用改进MCCIPM对IEEE 14、IEEE 30和IEEE 118节点系统算例展开测试。算例结果表明,文中方法收敛性好、计算效率高,可充分发挥TCPST的潮流控制能力,提高系统经济性。

1 TCPST 原理及潮流计算模型

1.1 TCPST 原理及结构

TCPST主要由三部分组成,分别为并联变压器、串联变压器以及控制装置^[20-21]。其中控制装置由电力电子元器件构成,控制装置结构的不同造成TCPST特点和控制方式的差异。TCPST结构如图1所示。图中 \dot{U}_a 、 \dot{U}_b 分别为TCPST所在支路首末端的电压相量; \dot{U}_R 为因TCPST接入新增的虚拟节点电压相量; r_{Rb} 、 x_{Rb} 分别为TCPST所在支路的等效电阻和电抗; P_0 、 P_1 分别为TCPST加入前后该线路的有功功率,其计算见式(1)和式(2)。

收稿日期:2021-03-21;修回日期:2021-05-29

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904500);江苏省“333高层次人才培养工程”专项资助项目(BRA202-0084)

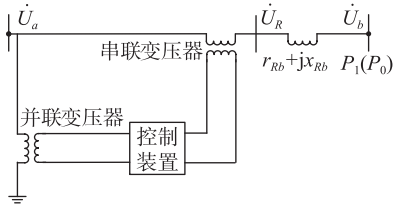


图1 TCPST 结构模型

Fig.1 Structure model of TCPST

$$P_0 = (U_a U_b / X_L) \sin(\varphi_b - \varphi_a) \quad (1)$$

$$P_1 = (U_R U_b / X_L) \sin(\varphi_b - \varphi_R) \quad (2)$$

式中: X_L 为线路电抗; φ_x 为节点 x 的相角, $x=a, b$ 。对比式(1)、式(2)可知, TCPST 通过串联变压器向所在线路注入电压从而改变线路末端电压幅值和相角、控制线路的潮流分布, 最终达到提高系统可靠性的目的。

1.2 TCPST 潮流计算模型

为了保证模型的精确性, 文中 TCPST 稳态模型采用串联电压源 \dot{U}_B 和并联电流源 \dot{I}_p 独立支路模型。该模型的基本思想是将 TCPST 所在支路分解为 TCPST 并联支路和原线路支路, 使得含 TCPST 系统的导纳矩阵仍按传统潮流方法计算获得且为对称矩阵, 从而避免由于设备的加入增加计算和编程的复杂程度。其等效电路见图 2。 \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 分别为流出节点 a 和流入节点 b 的电流相量; \dot{I}_2 为 TCPST 串联侧电流相量。

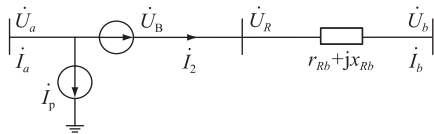


图2 含 TCPST 的网络示意

Fig.2 Schematic diagram of network with TCPST

根据电路原理, TCPST 等效电压源和电流源可分别表示为:

$$\begin{cases} \dot{U}_B = j\dot{U}_a \tan \varphi \\ \dot{I}_p = j\dot{I}_2 \tan \varphi \end{cases} \quad (3)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_a + \dot{U}_B - \dot{U}_b}{r_{Rb} + jx_{Rb}} \quad (4)$$

式中: φ 为 TCPST 的移相角。同时:

$$\dot{I}_b = \frac{j\dot{U}_a \tan \varphi}{r_{Rb} + jx_{Rb}} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \frac{j\dot{U}_a \tan \varphi}{r_{Rb} + jx_{Rb}} - j \frac{\dot{U}_a - \dot{U}_b + j\dot{U}_a \tan \varphi}{r_{Rb} + jx_{Rb}} \tan \varphi = \\ &= \frac{\dot{U}_a \tan \varphi + j\dot{U}_b \tan \varphi}{r_{Rb} + jx_{Rb}} \tan \varphi \end{aligned} \quad (6)$$

基于以上变换, 可将 TCPST 移出网络, 将 TCPST 的作用等效为两端的节点注入功率, 其节点注入功率模型如图 3 所示。 P_{Ta} 、 P_{Tb} 、 Q_{Ta} 、 Q_{Tb} 分别为 TCPST 对节点 a 和 b 的等效注入有功功率和无功功率。

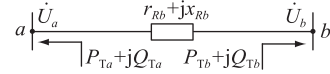


图3 TCPST 等效功率注入模型

Fig.3 Equivalent power injection model of TCPST

$$\begin{cases} P_{Ta} = g_{Rb} U_a^2 \tan^2 \varphi + U_a U_b (b_{Rb} \cos \varphi_{Rb} - g_{Rb} \sin \varphi_{Rb}) \tan \varphi \\ Q_{Ta} = -b_{Rb} U_a^2 \tan^2 \varphi + U_a U_b (g_{Rb} \cos \varphi_{Rb} + b_{Rb} \sin \varphi_{Rb}) \tan \varphi \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} P_{Tb} = U_a U_b (b_{Rb} \cos \varphi_{Rb} - g_{Rb} \sin \varphi_{Rb}) \tan \varphi \\ Q_{Tb} = U_a U_b (g_{Rb} \cos \varphi_{Rb} + b_{Rb} \sin \varphi_{Rb}) \tan \varphi \end{cases} \quad (8)$$

式中: g_{Rb} 、 b_{Rb} 分别为 TCPST 所在支路的等效电导和电纳, 且 $g_{Rb} + jb_{Rb} = (r_{Rb} + jx_{Rb})^{-1}$; φ_{Rb} 为线路 Rb 的相角。当 TCPST 加入系统之后, 可用上述等效注入功率来表示 TCPST 对系统潮流带来的影响。考虑到在高压输电线路中, 线路的等值电导远小于线路的等值电纳, 因此可以忽略线路的等值电导。由于 TCPST 相角和节点电压相角差不大, 所以可以忽略附加节点注入功率的无功分量而只计有功分量。因此, 等效功率注入可简化为:

$$\begin{cases} P_{Ta} = U_a U_b b_{Rb} \cos \varphi_{Rb} \tan \varphi \\ Q_{Ta} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} P_{Tb} = U_a U_b b_{Rb} \cos \varphi_{Rb} \tan \varphi \\ Q_{Tb} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

2 计及 TCPST 的电力系统 OPF 模型

OPF 问题标准形式可表示如下:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } h(x) = 0 \\ \underline{g} \leq g(x) \leq \bar{g} \end{cases} \quad (11)$$

式中: x 为此非线性规划优化的变量; $f(x)$ 为目标函数; $g(x)$ 、 $h(x)$ 分别为等式约束和不等式约束, 其中, \bar{g} 、 \underline{g} 分别为不等式约束的上限和下限。文中各节的电压、相角、发电机的有功和无功出力、TCPST 的相角等均是该非线性规划计算的控制变量, 在该 OPF 优化计算中均是可调节变量。

2.1 目标函数

为研究 TCPST 对线路有功损耗的调节作用, 同时简化计算, 文中以系统有功网损最小为目标函数

建立基于直角坐标系的 OPF 模型。其目标函数如下：

$$\min f = \min \sum_{i,j=1}^n G_{ij}(U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}) \quad (12)$$

式中： n 为节点数； U_i, U_j 分别为节点 i, j 的电压； G_{ij} 为导纳矩阵中对应元素的实部； θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 的电压相角差。

2.2 约束条件

(1) 等式约束：

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Di} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{Gi} - Q_{Di} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (13)$$

式中： P_{Gi}, Q_{Gi} 分别为节点 i 上发电机发出的有功功率和无功功率，但当节点 i 不与发电机相连时，二者均取 0； P_{Di}, Q_{Di} 为节点 i 的有功负荷和无功负荷； B_{ij} 为导纳矩阵中对应元素的虚部。

对于加入 TCPST 的线路，需在线路两端节点附加式(9)、式(10)表示的等效注入功率。因此，线路 ij 安装 TCPST 时，功率平衡方程为：

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Di} - P_{Ti} - P_{Tj} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{Gi} - Q_{Di} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (14)$$

式中： P_{Ti}, P_{Tj} 分别为 TCPST 对 i 和 j 的等效注入有功功率。

(2) TCPST 容量不等式约束：

$$0 \leq |\dot{U}_b (\dot{U}_a + \dot{U}_b - \dot{U}_b)^* (g_{Rb} + jb_{Rb})| \leq S_{\max} \quad (15)$$

式中： $*$ 表示共轭； S_{\max} 为容量上限。

(3) TCPST 调整控制不等式约束：

$$\begin{cases} U_{B\min} \leq U_B \leq U_{B\max} \\ \theta_{B\min} \leq \theta_B \leq \theta_{B\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中： $U_{B\max}, \theta_{B\max}$ 分别为串联侧电压源电压和相角的上限； $U_{B\min}, \theta_{B\min}$ 分别为串联侧电压源电压和相角的下限。

(4) 其余不等式约束：

$$\begin{cases} U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \\ \theta_{i\min} \leq \theta_i \leq \theta_{i\max} \\ P_{ij,\min} \leq P_{ij} \leq P_{ij,\max} \\ Q_{ij,\min} \leq Q_{ij} \leq Q_{ij,\max} \\ P_{Gi,\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,\max} \\ Q_{Gi,\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,\max} \end{cases} \quad (17)$$

式中： $U_{i\max}, U_{i\min}, \theta_{i\max}, \theta_{i\min}$ 分别为节点 i 的电压幅值和相角的上、下限值； $P_{ij,\max}, P_{ij,\min}, Q_{ij,\max}, Q_{ij,\min}$ 分别为线路 ij 有功功率和无功功率上、下限； $P_{Gi,\max}, P_{Gi,\min}, Q_{Gi,\max}, Q_{Gi,\min}$ 分别为节点 i 上发电机出力的上、下限。

3 改进 MCCIPM

为改善内点法在电力系统 OPF 计算中计算效率低等不足，当前多考虑在泰勒展开和迭代中保留部分高阶信息^[22-23]，提高牛顿迭代方向的同时，减少计算迭代总次数。MCCIPM 即为一种计及高阶项的改进内点法^[24]，对于 OPF 问题，构造拉格朗日函数如下：

$$L = f(\mathbf{x}) - \boldsymbol{\mu} \sum_{j=1}^r \ln l_j - \boldsymbol{\mu} \sum_{j=1}^r \ln u_j - \mathbf{y}^T \mathbf{h}(\mathbf{x}) - \mathbf{z}^T [\mathbf{g}(\mathbf{x}) - \mathbf{l} - \mathbf{g}] - \mathbf{w}^T [\mathbf{g}(\mathbf{x}) + \mathbf{u} - \bar{\mathbf{g}}] \quad (18)$$

式中共有 r 个不等式约束。其中， $\mathbf{y} = [y_1 \cdots y_m]^T, \mathbf{z} = [z_1 \cdots z_r]^T, \mathbf{w} = [w_1 \cdots w_r]^T$ 分别为等式约束和不等式约束的拉格朗日乘子； $\mathbf{l} = [l_1 \cdots l_r]^T, \mathbf{u} = [u_1 \cdots u_r]^T$ 为不等式约束的松弛变量，将该问题转化为只含等式约束的优化问题； $\boldsymbol{\mu}$ 为障碍函数的扰动因子。在针对各变量偏导进行泰勒级数展开时保留扰动因子的高阶项，在预测阶段对应求出仿射方向及步长，校正阶段求解映射到超立体空间中的牛顿方向利用牛顿-拉夫逊法完成迭代计算^[25]并完成下一步迭代。

为了更快速地寻求校正方向，减少迭代次数，首先将原 MCCIPM 的仿射方向步长增长为：

$$\alpha' = \min\{\max\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\} + \delta, 1\} \quad (19)$$

式中： α_1 为仿射方向步长； α_2 为中心方向步长； α_3 为校正方向步长； δ 为仿射步长增量。选取 3 个方向步长中最大值作为迭代计算的仿射步长，保证校正方向的快速性。基于此，对原、对偶变量更新可得：

$$\mathbf{m}' = \mathbf{m}^{(k)} + \alpha' \Delta \mathbf{b}_1 \quad (20)$$

式中： \mathbf{m}' 为迭代更新后的各变量； $\Delta \mathbf{b}_1$ 为仿射方向； k 为迭代次数； $\mathbf{m} = [\mathbf{x} \ \mathbf{y} \ \mathbf{z} \ \mathbf{w} \ \mathbf{l} \ \mathbf{u}]$ 为计算中各变量。设向量 \mathbf{p}', \mathbf{q}' 为：

$$\begin{cases} \mathbf{p}' = \mathbf{l}' \mathbf{z}' \\ \mathbf{q}' = \mathbf{u}' \mathbf{w}' \end{cases} \quad (21)$$

式中： $\mathbf{l}' = \text{diag} [l'_1 \cdots l'_r]^T, \mathbf{z}' = \text{diag} [z'_1 \cdots z'_r]^T, \mathbf{u}' = \text{diag} [u'_1 \cdots u'_r]^T, \mathbf{w}' = \text{diag} [w'_1 \cdots w'_r]^T$ ，且各迭代变量均通过式(19)更新获得。将 \mathbf{p}', \mathbf{q}' 映射到超立体空间 $\boldsymbol{\Omega} = [\beta_{\max} \ \boldsymbol{\mu}_1 \ \beta_{\min} \ \boldsymbol{\mu}_1]$ 得到新的向量 \mathbf{p} 和 \mathbf{q} 。其中， $\boldsymbol{\mu}_1$ 为预测步骤中获得的仿射扰动因子；

β_{\max} , β_{\min} 为设定的空间阈值的最大、最小值。基于以上映射,求解中心-校正方向 $\Delta \mathbf{b}_{23}$ 及总牛顿方向 $\Delta \mathbf{b}$,表示为:

$$\nabla^2 L(\mathbf{m}) \cdot \Delta \mathbf{b}_{23} = \mathbf{n} \quad (22)$$

$$\Delta \mathbf{b} = \Delta \mathbf{b}_1 + \Delta \mathbf{b}_{23} \quad (23)$$

式中: $\mathbf{n} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \mathbf{p} - \mathbf{p}' \ \mathbf{q} - \mathbf{q}']^T$ 。得到 $\Delta \mathbf{b}$ 后与常规原-对偶内点法一样进行迭代求解即可。为改善数据结构,增加向量 \mathbf{n} 中非零元素个数,即增加映射在超立体空间边界上的元素,文中选择改变仿射步长增量 δ 的取值。已有研究中, δ 的取值通常小于 0.3^[26],文中通过算例测试,在式(19)大幅增大仿射步长的前提下,仿射步长增量 δ , β_{\max} , β_{\min} 分别取 0.65, 0.1, 10 时, MCCIPM 迭代速度快且具有良好的收敛性。

4 算例分析与测试

选取 IEEE 14、IEEE 30 和 IEEE 118 节点系统进行仿真测试, TCPST 移相角的上、下限分别设置为 30° 和 -30° 。基于 Matlab 2014a 进行编程,测试的硬件平台基于 PC 机,处理器为 Inter Core i5-3470 3.20 GHz CPU, 8 GB 内存。

根据选址原则, TCPST 应安装在优化效果最好的关键支路上^[27-30], 表 1 列出了各系统 TCPST 安装的最佳位置。

表 1 测试系统基本参数

Table 1 Basic parameters of test system

测试系统	发电机/台	线路/条	TCPST 安装位置
IEEE 14	5	20	支路 4—7
IEEE 30	6	41	支路 6—8
IEEE 118	54	186	支路 7—12

4.1 不同算法及有功网损结果

为了校验改进 MCCIPM 算法在求解含 TCPST 的 OPF 问题中的正确性和有效性,表 2 给出了 PDIPM 与改进 MCCIPM 算法求解 OPF 的迭代次数对比。同时,为验证 TCPST 具备提高系统运行经济性的能力,基于文中方法对有无 TCPST 系统进行 OPF 计算,系统有功网损对比结果如表 2 所示。

表 2 OPF 计算结果对比

Table 2 Comparison of OPF calculation results

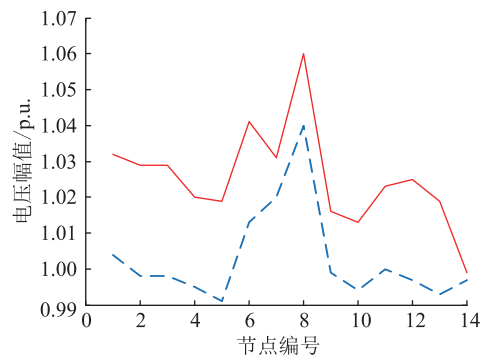
系统节点数	TCPST 最优相角/ $^\circ$	迭代次数		有功网损/MW		有功网损降低比例/%
		PDIPM	改进 MCCIPM	无 TCPST	有 TCPST	
14	-2.77	12	7	1.41	1.20	14.89
30	-4.29	13	7	3.1	2.2	29.0
118	3.95	17	9	332.4	319.6	3.85

从 2 种算法的迭代次数可以看出, PDIPM 对不同系统进行 OPF 计算时迭代次数均远高于文中所提的改进 MCCIPM; 且随着系统增大, PDIPM 迭代次数增加明显, 更易出现大系统迭代计算缓慢甚至无解等现象。反观文中算法, 不同系统在 OPF 计算中均能快速收敛, 且迭代次数受系统大小影响不大。除此之外, 含 TCPST 系统的有功网损较原系统有明显下降, 其中 IEEE 14 和 IEEE 30 节点系统有功网损降低比例较大, 分别为 14.29% 和 29.03%, 调节效果明显; 而 IEEE 118 节点系统因为系统较大, 仅加入一台 TCPST 时, 有功网损降低不明显, 仅为 3.85%。以上分析可知, 改进 MCCIPM 可有效减少迭代次数, 提高 OPF 计算效率, 且在大系统 OPF 计算中仍具备良好的收敛性。同时, TCPST 的加入可大幅降低系统运行的有功损耗, 在大系统中考虑增加 TCPST 设备数可以更好地提高系统运行的稳定性和经济性。

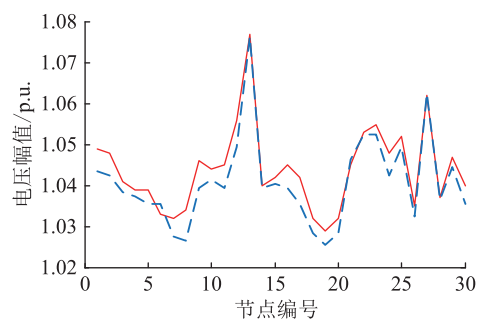
4.2 电压质量结果

为了验证 TCPST 对系统电能质量的改善效果, 对不同系统进行算例分析。图 4 为 TCPST 的加入对系统节点电压幅值的影响程度。

由图 4(a) 可以看出, 节点 8 在系统未加入 TCPST 时有电压幅值不满足安全约束的情况, 而在加入 TCPST 后, 该节点的电压幅值满足相关要求。若以电压合格率的方式描述系统电压水平, IEEE 14 节点系统在加入 TCPST 后, 电压总合格率由初始的 92.86% 提高到 100%。除此之外, 安装 TCPST 之前,



(a) IEEE 14 节点系统



(b) IEEE 30 节点系统

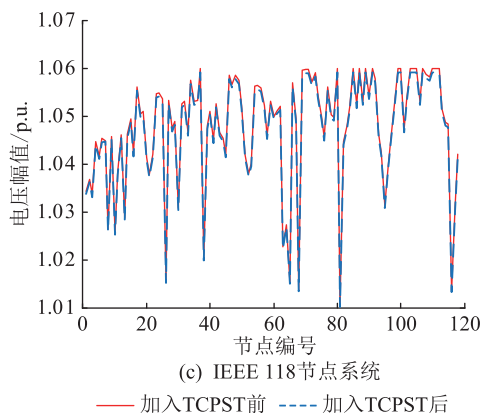


图4 TCPST加入前后各节点电压幅值对比
Fig.4 Voltage amplitude comparison of each node before and after TCPST addition

系统各节点的电压偏移总和为 35.8%;TCPST 参与调节后,电压偏移总和大幅度降低至 13.5%。IEEE 30 节点系统加入 TCPST 后,系统各节点的电压偏移总和从 131.9%降低到 122.1%。而在 IEEE 118 节点系统,仅加入 1 台 TCPST 并没有对其节点电压偏移产生明显影响。综上,在中小型系统中,TCPST 的加入在降低系统有功损耗的同时,能有效减小节点电压偏差,提高系统的电能质量;且为了更好地改善大型系统电能质量,提高大系统稳定性和经济性,可酌情增加 TCPST 安装数量,以更好地发挥 TCPST 控制潮流分布、降低系统网损等功能。

5 结语

文中基于 TCPST 的原理及结构模型,以系统有功网损最小为目标函数,建立了计及 TCPST 的电力系统 OPF 模型,提出了基于改进 MCCIPM 的含 TCPST 系统 OPF 计算方法。

改进 MCCIPM 方法可有效提高 OPF 计算效率,降低迭代次数,满足系统对求解速度的要求。TCPST 可降低系统运行成本,提高系统安全性,在中小型配电网中,其调节作用更加明显。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目“基于可控移相器(TCPST)的柔性交流潮流运行控制技术”资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 潘本仁,王和春,张妍,等. 含分布式电源的主动配电网重构策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(15):102-107.
PAN Benren,WANG Hechun,ZHANG Yan,et al. Study on an active distribution network reconstruction strategy with distributed power supply[J]. Power System Protection and Control, 2020,48(15):102-107.

[2] 黄天恩,郭庆来,孙宏斌,等. 模型-数据混合驱动的电网友全特征选择和知识发现关键技术与工程应用[J]. 电力系统

自动化,2019,43(1):95-101,208.

HUANG Tianen, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Hybrid model and data driven concepts for power system security feature selection and knowledge discovery: key technologies and engineering application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43(1):95-101,208.

[3] 谭政宇,陈仕军,黄炜斌,等. 基于四川水电调峰外送情景下的受端电网接纳空间分析[J]. 电网与清洁能源,2020,36(12):67-74.

TAN Zhengyu, CHEN Shijun, HUANG Weibin, et al. Receiving space analysis of receiving power grid based on sichuan hydro-power peak load regulation scenario [J]. Power System and Clean Energy, 2020,36(12):67-74.

[4] 刘道伟,李柏青,邵广惠,等. 基于大数据及人工智能的大电网智能调控系统框架[J]. 电力信息与通信技术,2019,17(3):14-21.

LIU Daowei, LI Baiqing, SHAO Guanghui, et al. Intelligent control system framework based on big data and artificial intelligence for large power grid[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2019,17(3):14-21.

[5] 苏莎莎,赵一鸣,谢炯,等. 电网调度数据网 SM 算法优化方案[J]. 电力信息与通信技术,2020,18(11):15-21.

SU Shasha, ZHAO Yiming, XIE Jiong, et al. Optimization scheme of SM algorithm in power grid dispatching data network [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020,18(11):15-21.

[6] PURWOHARJONO P, PENANGSANG O, ABDILLAH M, et al. Optimal design of TCPST using gravitational search algorithm [C]//2012 Sixth UKSim/AMSS European Symposium on Computer Modeling and Simulation. Malta, Malta. IEEE, 2012:323-328.

[7] LIU J, HAO X D, WANG X, et al. Application of thyristor controlled phase shifting transformer excitation impedance switching control to suppress short-circuit fault current level[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018,6(4):821-832.

[8] 唐爱红,石诚成,郑旭,等. 基于半定规划法的含分布式潮流控制器最优潮流[J]. 电力系统自动化,2020,44(4):119-125.

TANG Aihong, SHI Chengcheng, ZHENG Xu, et al. Optimal power flow with distributed power flow controller based on semi-definite programming method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020,44(4):119-125.

[9] 李成豪,王淳,尹发根,等. 含潮流路由器的配电网最优潮流计算[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(6):1-8.

LI Chenghao, WANG Chun, YIN Fagen, et al. Optimal power flow calculation including power flow router in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019,47(6):1-8.

[10] JUN L, FANG W L, DUAN C, et al. Fault current limiting by phase shifting angle control of TCPST[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver, CO, USA. IEEE,

- 2015:1-6.
- [11] WIRMOND V E, FERNANDES T S P, TORTELLI O L. TCPST allocation using optimal power flow and genetic algorithms[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(4):880-886.
- [12] 杨肖虎, 罗剑波, 郁琛, 等. 适应大规模新能源并网的电力系统备用配置及优化综述[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1):10-20, 63.
YANG Xiaohu, LUO Jianbo, YU Chen, et al. Review of power system reserve configuration and optimization for large-scale renewable energy integration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1):10-20, 63.
- [13] BANU R N, DEVARAJ D. Optimal power flow for steady state security enhancement using genetic algorithm with FACTS devices[C]//2008 IEEE Region 10 and the Third international Conference on Industrial and Information Systems. Kharagpur, India. IEEE, 2008:1-6.
- [14] S N Singh, A K David. 有 FACTS 装置的电力系统在市场环境下的最优调度[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(4):20-24, 44.
SINGH S N, DAVID A K. Optimal dispatching of power system with FACTS in market environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(4):20-24, 44.
- [15] ALABDULJABBAR A A, MILANOVI J V. Assessment of techno-economic contribution of FACTS devices to power system operation[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(10):1247-1255.
- [16] 张立志, 赵冬梅. FACTS 优化配置提高电网最大输电能力[J]. 电网技术, 2006, 30(S2):58-62.
ZHANG Lizhi, ZHAO Dongmei. Optimal placement of FACTS for total transfer capability enhancement[J]. Power System Technology, 2006, 30(S2):58-62.
- [17] 康逸群, 宋梦琼, 罗辉, 等. 计及可控移相器的电力系统潮流优化[J]. 湖北电力, 2016, 40(10):11-16, 27.
KANG Yiqun, SONG Mengqiong, LUO Hui, et al. Optimal power flow of power system with thyristor controlled phase shifting transformer[J]. Hubei Electric Power, 2016, 40(10):11-16, 27.
- [18] 蔡广林, 张勇军, 任震. 基于非线性多中心校正内点法的最优潮流算法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12):133-139.
CAI Guanglin, ZHANG Yongjun, REN Zhen. Optimal power flow algorithm based on nonlinear multiple centrality corrections interior point method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12):133-139.
- [19] 孙国强, 任宾, 卫志农, 等. 基于改进多中心一校正内点法的可用输电能力计算[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16):47-52.
SUN Guoqiang, REN Bin, WEI Zhinong, et al. Calculation of available transfer capability based on improved multiple-centrality-correction interior point algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16):47-52.
- [20] 候承昊, 戴朝波, 孙莹, 等. 可控移相器研究现状及其发展前景[J]. 智能电网, 2014, 2(1):18-21.
HOU Chenghao, DAI Chaobo, SUN Ying, et al. Status quo and feature of thyristor controlled phase shifting transformer[J]. Smart Grid, 2014, 2(1):18-21.
- [21] 徐殿国, 张书鑫, 李彬彬. 电力系统柔性一次设备及其关键技术:应用与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7):2-22.
XU Dianguo, ZHANG Shuxin, LI Binbin. Flexible primary equipment in power system and their key technologies: applications and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7):2-22.
- [22] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社, 2003.
WANG Xifan. Analysis of modern power system[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [23] TORRES G L, QUINTANA V H. On a nonlinear multiple-centrality-corrections interior-point method for optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(2):222-228.
- [24] 乐秀璠, 覃振成, 杨博, 等. 基于改进多中心-校正内点法的最优潮流[J]. 电网技术, 2005, 29(12):47-52.
YUE Xiufan, QIN Zhencheng, YANG Bo, et al. Optimal power flow based on improved multiple centrality-correction interior point method[J]. Power System Technology, 2005, 29(12):47-52.
- [25] 马瑞, 王大朔. 考虑天然气 $N-1$ 的多能流系统静态安全耦合分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6):1627-1636, 1859.
MA Rui, WANG Dashuo. Static security coupling analysis of multi-energy flow system considering natural gas system $N-1$ contingency[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6):1627-1636, 1859.
- [26] 简金宝, 杨林峰, 全然. 基于改进多中心校正解耦内点法的动态最优潮流并行算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6):232-241.
JIAN Jinbao, YANG Linfeng, QUAN Ran. Parallel algorithm of dynamic optimal power flow based on improved multiple centrality corrections decoupling interior point method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6):232-241.
- [27] 崔勇, 陈洁羽, 刘俊. 提高输电断面传输能力的可控移相器最优选址算法研究[J]. 陕西电力, 2013, 41(11):75-79, 101.
CUI Yong, CHEN Jieyu, LIU Jun. Optimal allocation of TCPS for enhancing transfer capability of electric power transmission section[J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(11):75-79, 101.
- [28] 常宝立, 李海峰, 付俊波, 等. 基于支路追加法的可控移相器对短路电流的影响研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(7):98-103, 116.
CHANG Baoli, LI Haifeng, FU Junbo, et al. Influence of TCPST on short circuit current based on branch additional method[J]. Smart Power, 2019, 47(7):98-103, 116.
- [29] 曹路, 付俊波, 唐陇军, 等. 可控移相器对系统不对称短路

电流的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 1-7.

CAO Lu, FU Junbo, TANG Longjun, et al. Study on the influence of TCPST on asymmetric short circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 1-7.

[30] 卫鹏, 周前, 朱鑫要, 等. 可控移相器对特高压交直流接入受端电网影响研究[J]. 中国电力, 2018, 51(7): 7-12.

WEI Peng, ZHOU Qian, ZHU Xinyao, et al. Research on impact of TCPST on receiving-end power grid with UHVAC and UHVDC accessing[J]. Electric Power, 2018, 51(7): 7-12.

作者简介:



张宁宇

张宁宇(1985), 男, 博士, 工程师, 从事电力系统优化运行、柔性交流输电技术相关工作 (E-mail: zhangny190@163.com);

张恪(1995), 男, 硕士在读, 研究方向为电力系统优化运行;

李群(1967), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 从事大电网安全稳定分析与控制、新能源发电技术、输变电系统电能质量分析工作。

Optimal power flow calculation of power system containing TCPST based on improved MCCIPM

ZHANG Ningyu¹, ZHANG Ke², LI Qun¹, LIU Jiankun¹, ZHAO Jingbo¹, SUN Guoqiang²

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

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

Abstract: As more and more flexible AC transmission devices are used in modern power systems, the research of optimal power flow (OPF) with thyristor controlled phase shifting transformer (TCPST) is facing new challenges. In order to ensure the security of the system, the equivalent power injection model of the TCPST access system is combined to establish the optimal power flow model with TCPST with the objective function of the minimum active power loss. In order to improve the convergence speed, the multicenter correction interior point method is improved. The iteration step of the affine direction is improved and the key mapping parameters is reconfigured. Based on the improved multicenter correction interior point method, the optimal power flow calculation test is completed in IEEE 14, IEEE 30 and IEEE 118 node networks, and the control ability of TCPST to line power flow distribution is tested. The test results show that the improved interior point method proposed in this paper is feasible and practical.

Keywords: thyristor controlled phase shifting transformer (TCPST); optimal power flow (OPF); minimum active power loss; affine direction step; improved multi center-correction interior point method (MCCIPM)

(编辑 方晶)