

安全约束最优潮流的实用模型及故障态约束缩减方法

郭瑞鹏¹, 边麟龙¹, 宋少群², 余秀月², 汤伟³, 杨铨³

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 国网福建电力调度控制中心, 福建省福州市 350003;

3. 国网安徽电力调度控制中心, 安徽省合肥市 230022)

摘要: 针对大型电力系统安全约束最优潮流(SCOPF)问题具有的规模庞大、求解困难的特点, 提出了基于潮流转移关系的 SCOPF 实用模型及故障态约束缩减方法。首先通过预想故障分析建立故障前后的有功潮流转移关系, 将故障态支路有功潮流描述为基态支路有功潮流的函数, 从而将故障态支路有功潮流约束描述为基态支路有功潮流的线性不等式约束; 然后通过对并联线路或并列主变压器进行分组, 利用组内支路的有功潮流分布关系减少需监视的支路规模; 最后利用设备短时通流能力明显大于其长期通流能力的特征对故障态支路潮流约束进行过滤, 以尽可能减小 SCOPF 问题的计算规模。IEEE 14 节点测试系统和华东电网的仿真分析验证了所提模型及约束缩减方法的正确性和有效性。

关键词: 预想故障; 潮流转移关系; 安全约束最优潮流; 原对偶内点法; 约束缩减方法

0 引言

电力系统安全运行应满足 3 类约束条件: ①系统负荷需求; ②运行约束(无潮流和电压越限); ③可靠性约束(能承受一定预想故障的冲击)^[1]。最优潮流以潮流方程为基础, 进行经济与安全、有功与无功功率的全面优化, 但仅考虑前 2 类约束, 没有考虑可靠性约束。当某个电力设备发生故障并退出运行时, 将引起潮流在电网中的重新分配, 并可能导致部分电力设备潮流明显增大, 若超过其短时过载能力, 则可能在运行人员来不及干预的情况下发生连锁开断, 给电网的安全运行带来严重威胁^[2]。

由于电力系统故障的实时自动处理在技术上仍存在较大困难, 故电网安全运行的着眼点在于预防事故后果。为避免预想开断引发连锁故障, 给运行人员处理事故留出充足的时间, 需要对电网正常运行时的潮流进行适当的控制, 以保证可信的预想开断发生时不会引起电力设备潮流超过其短时允许载流量。安全约束最优潮流(security constrained optimal power flow, SCOPF)在最优潮流(OPF)模型的基础上, 添加了可靠性约束, 能够较好地保障电网的安全可靠运行。

对于大型电力系统, 由于预想故障集的规模庞

大, 若对所有预想故障状态进行详细建模, 并考虑其可靠性约束, 则 SCOPF 问题的计算规模将非常庞大, 其数值求解存在巨大困难, 不具有实用价值。如何提高 SCOPF 问题的求解效率是其能否实用化的关键。Benders 分解法^[3-4]、并行计算技术^[5]及专用稀疏矩阵处理技术^[6]均被研究用于提高 SCOPF 问题的求解效率。文献[7-10]通过对预想故障集进行过滤, 从而只考虑部分关键故障的可靠性约束, 以减少预想故障集的规模。由于难以一次性给出准确的关键故障集, 该方法一般需要通过循环进行多次关键故障集筛选, 并进行多次针对关键故障集的 SCOPF 计算, 其计算效率仍然较低。此外, 若 SCOPF 问题最优解处起作用的故障集规模较大, 则筛选后的关键故障集规模仍较大, SCOPF 问题的求解效率可能很低, 应用于大型电力系统仍存在巨大困难。文献[11]利用线路开断分布因子, 将预想开断后的支路有功潮流描述为基态支路有功潮流的函数, 建立了基于直流潮流法的 SCOPF 模型, 并在算法实现中忽略了分布因子足够小的支路, 提高了计算效率。但该方法完全忽略了有功损耗对电网运行经济性的影响, 可能给优化结果带来较大偏差。

本文基于交流潮流模型建立基态约束条件, 利用故障前后的有功潮流转移关系建立故障态约束条件, 通过对并联线路或并列主变压器进行分组, 减少需监视的支路规模, 并利用设备短时通流能力大于长期通流能力的特征对故障态约束进行过滤, 减小

了 SCOPF 问题的计算规模。IEEE 14 节点测试系统和华东电网的仿真分析验证了所提 SCOPF 模型及约束缩减方法的正确性和有效性。

1 基于潮流转移关系的 SCOPF 模型

1.1 目标函数

安全约束最优潮流一般以基态下机组总发电费用之和最小作为优化目标,即

$$\min \sum_{i=1}^{N_G} (c_{oi} + c_{li} P_{Gi}^0 + c_{qi} (P_{Gi}^0)^2) \tag{1}$$

式中: N_G 为机组数量; c_{oi} , c_{li} , c_{qi} 分别为机组 i 发电成本的常数、线性和二次项系数; P_{Gi}^0 为机组 i 的基态有功出力,其中上标 0 表示基态。

1.2 基态约束

1) 节点功率平衡约束

根据基尔霍夫电流定律,各节点有功及无功潮流均需保持平衡,即

$$\pi_G P_G^0 - \pi_L P_L - P_{inj}^0(V, \theta) = 0 \tag{2}$$

$$\pi_G Q_G^0 - \pi_L Q_L - Q_{inj}^0(V, \theta) = 0 \tag{3}$$

式中: π_G 为节点机组关联矩阵; π_L 为节点负荷关联矩阵; P_G^0 和 Q_G^0 分别为机组基态有功和无功出力向量; P_L 和 Q_L 分别为负荷有功及无功向量; V 和 θ 分别为节点电压幅值向量及相位向量; $P_{inj}^0(V, \theta)$ 为基态网络有功注入函数向量; $Q_{inj}^0(V, \theta)$ 为基态网络无功注入函数向量。

2) 机组出力约束

各机组有功及无功出力均应满足其上下限约束,即

$$\begin{cases} P_{Gi} \leq P_{Gi}^0 \leq \bar{P}_{Gi} \\ Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^0 \leq \bar{Q}_{Gi} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N_G \tag{4}$$

式中: Q_{Gi}^0 为基态下机组 i 的无功出力; P_{Gi} 和 $\bar{P}_{Gi}$ 分别为机组 i 的有功出力下限及上限; Q_{Gi} 和 $\bar{Q}_{Gi}$ 分别为机组 i 的无功出力下限及上限。

3) 节点电压约束

各节点电压幅值应满足其上下限约束,即

$$\underline{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i \quad i \in S_N \tag{5}$$

式中: $\underline{V}_i$ 和 $\bar{V}_i$ 分别为节点 i 电压幅值的下限及上限; S_N 为节点集合。

4) 支路潮流约束

支路潮流约束实用中有 2 种描述方式:一种是支路电流不越限;另一种是支路有功潮流不越限。这里采用第 2 种。根据支路允许电流或容量计算有功功率上限时一般取一定的保守系数,如 0.95。

引入变量 P_{Bj}^0 表示支路 j 始端流向末端的基态

有功潮流,则 P_{Bj}^0 可以描述为节点电压幅值向量及节点电压相位向量的函数,即

$$P_{Bj}^0 - f_{Bj}^0(V, \theta) = 0 \quad j \in S_B \tag{6}$$

式中: S_B 为支路集合。

支路基态有功潮流允许范围约束可描述如下:

$$-\bar{P}_{Bj} \leq P_{Bj}^0 \leq \bar{P}_{Bj} \quad j \in S_B \tag{7}$$

式中: $\bar{P}_{Bj}$ 为支路 j 的长期允许载流量。

式(6)和式(7)给出了支路始端流向末端的有功潮流约束。理论上还应该考虑支路末端流向始端的有功潮流约束。考虑到与设备长期允许载流量相比,支路有功损耗一般足够小,故支路始端有功潮流不越限,支路末端有功潮流在误差许可范围内可以认为不会越限,故实用中可以仅添加支路始端的有功潮流约束以减小计算规模。

5) 暂态稳定断面功率极限区间约束

输电断面作为功率输送的通道和电气联系的走廊,集中体现了电网中的薄弱环节,当传送功率过大时,可能存在安全稳定隐患。实用中,电网调度运行人员需要通过暂态安全稳定时域仿真计算确定输电断面暂态稳定极限功率区间^[12-13]。

暂态稳定断面功率极限区间约束可描述为:

$$P_t \leq \sum_{j \in T_t} D_{t,j} P_{Bj}^0 \leq \bar{P}_t \quad t \in S_T \tag{8}$$

式中: S_T 为输电断面集; t 为输电断面编号; T_t 为输电断面 t 的支路集; $D_{t,j}$ 为输电断面 t 中支路 j 的方向系数,支路始端流向末端的潮流方向与输电断面参考方向一致时取 1,不一致时取 -1; P_t 和 $\bar{P}_t$ 分别为输电断面 t 功率极限区间的下限及上限。

1.3 故障态约束

电力系统安全运行的可靠性约束要求电网能够承受一定预想故障的冲击,即预想故障发生导致部分电力设备退出运行时,任意电力设备的潮流均不超过其短时过载能力,以避免发生连锁开断,给运行人员处理故障留出充足的时间。

预想故障集的选择实用中一般采用 $N-1$ 安全准则,主要考虑线路 $N-1$ 故障、主变压器 $N-1$ 故障及母线 $N-1$ 故障。机组 $N-1$ 故障的后果与相应升压变压器 $N-1$ 故障的后果基本相当,实用中可以忽略。

高压电网中,支路有功潮流间具有较好的线性关系,方便建立预想故障前后支路有功潮流间的联系。根据文献[14],预想故障 k 发生后,支路 j 的故障态有功潮流可描述为其基态有功潮流及所开断各支路基态有功潮流的线性函数,即

$$P_{Bj}^k = P_{Bj}^0 + \sum_{i \in S_B^k} R_{ij}^k P_{Bi}^0 \quad k \in C, j \in S_B^k \tag{9}$$

式中: C 为预想故障集; P_{Bj}^k 为预想故障 k 发生后支路 j 的有功潮流; P_{Bj}^0 和 P_{Bj}^0 分别为支路 i 和 j 的基态有功潮流; R_{ij}^k 为预想故障 k 发生后开断支路 i 对非开断支路 j 的潮流转移系数; S_F^k 为预想故障 k 开断的支路集; S_B^k 为预想故障 k 发生后的运行支路集, 有 $S_B^k = S_B / S_F^k$ 。

潮流转移关系的计算可以采用交流潮流法^[14]或直流潮流法^[15]。文献[16]较为详细地介绍了潮流转移比的概念及计算方法, 并给出了适用于大规模电力系统潮流转移比计算的多核并行批处理方法。潮流转移关系则是根据潮流转移比将故障后支路有功潮流描述为故障前支路有功潮流的线性函数。

在 OPF 模型的基础上添加考虑 $N-1$ 安全准则的可靠性约束, 即

$$-\bar{E}_{Bj} \leq P_{Bj}^k \leq \bar{E}_{Bj} \quad k \in C, j \in S_B^k \quad (10)$$

式中: $\bar{E}_{Bj}$ 为支路 j 的短时允许载流量。

SCOPF 模型在 OPF 模型的基础上添加了式(9)及式(10)的可靠性约束, 将导致发电成本升高, 但优化结果能够满足静态安全校核要求, 即预想故障发生后各电力设备的有功潮流均不会超过其短时过载能力, 为事故处理留出足够的时间。

潮流转移关系的计算精度对 SCOPF 的计算结果有一定影响。对于实际输电网, 由于支路的 R/X 比值较小, 采用直流潮流法或交流潮流法计算潮流转移关系一般能够满足工程应用要求。对于精度要求较高的场合, 可以添加外循环, 在 SCOPF 结果处采用交流潮流法更新潮流转移关系, 并重新进行 SCOPF 计算, 直至满足期望的计算精度要求。

2 SCOPF 模型缩减方法

由式(1)至式(10)构成的 SCOPF 模型的计算规模巨大, 其数值求解的计算效率难以满足实际大电网的应用要求。

2.1 监视支路选择

不论是基态, 还是故障态, 对于并联线路或并列主变压器, 其有功潮流的分配比例近似为常数。对于并联线路, 各线路的有功潮流分配比例主要由其阻抗决定, 两条参数相同的线路并联, 各线路上流过的有功潮流必定相同。对于并列主变压器, 以图 1 所示的两台 500 kV 并列主变压器为例加以说明。典型的, 主变压器低压侧仅连接并联补偿设备, 故低压绕组的有功潮流恒为 0。若忽略主变压器损耗, 则任一主变压器高压绕组的有功潮流等于中压绕组的有功潮流, 两台主变压器的有功潮流分配比例主

要由其高、中压绕组的阻抗之和决定。

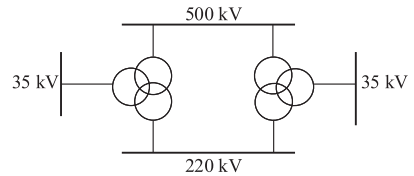


图 1 500 kV 并列主变压器结构
Fig.1 Structure of parallel 500 kV transformers

将并联线路或并列主变压器划分为组。定义流入设备组的有功潮流之和为设备组有功潮流, 定义支路有功潮流占设备组有功潮流的比例为分支系数, 即

$$K_{Bj} = \frac{P_{Bj}}{P_{\Sigma g}} \quad g \in S_G, j \in D_g^0 \quad (11)$$

式中: K_{Bj} 为支路 j 在其相应设备组中的分支系数; P_{Bj} 为支路 j 的有功潮流; g 为设备组编号; $P_{\Sigma g}$ 为设备组 g 的总有功潮流; S_G 为设备组的集合; D_g^0 为设备组 g 基态下的运行支路集。

由于分支系数近似为常数, 与具体的运行状态关系不大, 故可以根据基态潮流确定。

由于同一设备组内各支路的有功潮流分配比例近似为常数, 故每个设备组中仅需对分支系数与允许载流量比值最大的支路进行监视。

对于基态支路潮流约束, 可根据式(12)选择需监视的支路。

$$\max_{j \in D_g^0} \left\{ \left| \frac{K_{Bj}}{\bar{P}_{Bj}} \right| \right\} \quad g \in S_G \quad (12)$$

将基态支路有功潮流描述为监视支路有功潮流的函数, 则有

$$P_{Bj}^0 = \frac{K_{Bj}}{K_{BM_j}} P_{BM_j}^0 \quad j \in S_B \quad (13)$$

式中: M_j 为支路 j 所属设备组的基态监视支路编号。

对于故障态支路潮流约束, 可根据式(14)选择需监视的支路。

$$\max_{j \in D_g^k} \left\{ \left| \frac{K_{Bj}}{\bar{E}_{Bj}} \right| \right\} \quad g \in S_G \quad (14)$$

式中: D_g^k 为设备组 g 故障态 k 下的运行支路集。

根据式(12)或式(14)选择的监视支路是设备组在相应运行状态中最容易越限的支路。若该支路有功潮流不越限, 则该设备组中所有支路的有功潮流都不会越限。

根据上述分析, 式(6)、式(7)、式(9)及式(10)可替换为:

$$P_{Bj}^0 - f_{Bj}^0(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) = 0 \quad j \in \bar{S}_B \quad (15)$$

-P_{Bj}⁰ ≤ P_{Bj}⁰ ≤ P_{Bj}⁰ j ∈ S_B (16)

P_{Bj}^k = K_{BMj}⁰ P_{BMj}⁰ + ∑_{i ∈ S_F^k} R_{ij}^k K_{Bi}⁰ P_{BMi}⁰ (17)

-E_{Bj}⁰ ≤ P_{Bj}^k ≤ E_{Bj}⁰ k ∈ C, j ∈ S_B^k (18)

式中: S_B⁰ 为基态下各设备组的监视支路构成的集合; S_B^k 为各设备组故障态 k 下的监视支路构成的集合。

通过监视支路选择,式(15)及式(16)仅添加各监视支路的基态有功潮流变量及相应的上下限约束,式(17)及式(18)也仅对监视支路添加潮流转移关系及故障态潮流约束。典型的,500 kV 变电站的目标规模为 3 台主变压器并列运行,9 条支路中仅需选择 1 条监视支路,故实际电网中所选择的监视支路数远小于所有支路数。监视支路选择有助于显著减小 SCOPF 问题的计算规模。

此外,式(17)事实上是将式(9)中各支路基态有功潮流的线性函数变换为各设备组中监视支路基态有功潮流的线性函数。由于式(9)中的相关支路可能属于同一设备组,可以合并同类项,故式(17)比式(9)具有更好的稀疏性,有助于提高 SCOPF 问题的求解效率。

2.2 故障态约束过滤

SCOPF 问题中故障态约束条件的数目非常可观,给其数值求解带来了巨大困难,如何减少故障态约束条件是 SCOPF 模型能否实用化的关键。对于实际电力系统,预想故障的影响范围一般较为有限,故可以仅对故障影响域内的设备进行监视^[17]。

电力线路及变压器一般具有一定的承受短时功率冲击的能力,故短时允许载流量明显大于其长期允许载流量。架空线路的短时过载倍数一般大于 1.3,新投运主变压器的短时过载倍数甚至高达 1.8 以上。实用中,可以利用短时过载倍数大于 1 的特点对故障态约束进行过滤。

由式(16)及式(17)可得:

|P_{Bj}^k| = |K_{BMj}⁰ P_{BMj}⁰ + ∑_{i ∈ S_F^k} R_{ij}^k K_{Bi}⁰ P_{BMi}⁰| ≤ (19)

P_{Bj}^k = K_{BMj}⁰ P_{BMj}⁰ + ∑_{i ∈ S_F^k} R_{ij}^k K_{Bi}⁰ P_{BMi}⁰ (20)

则 P_{Bj}^k 为电网基态潮流满足安全约束时 |P_{Bj}^k| 的上界,是与电网运行状态无关的常量。

若

P_{Bj}^k ≤ E_{Bj}⁰ (21)

则式(18)中对应的不等式约束必定成立,即相应的约束为冗余约束,对优化结果没有影响。

式(20)及式(21)中的参数均可以在优化计算前得到,故可以用于对故障态支路潮流约束进行筛选,只将可能起作用的约束加入优化模型中,从而大大减小 SCOPF 问题的计算规模,提高数值求解效率。

3 算例分析

本文提出的 SCOPF 模型数学上为非线性规划问题,可以采用非线性规划原对偶内点法求解。原对偶内点法的介绍见文献[18],这里不再赘述。

基于本文所提出的模型及约束缩减方法,采用 C++ 语言开发了电力系统 SCOPF 软件,并用于对 IEEE 14 节点测试系统及华东电网进行仿真测试。仿真环境为 Microsoft Visual Studio 2015,计算机硬件配置为 Intel(R) Core(TM) i7-7700HQ CPU @2.81 GHz,16 GB 内存。仿真中,原对偶内点法的向心参数取 0.3,IEEE 测试算例的精度要求取为 1.0⁻⁸,华东电网测试算例的精度取 1.0⁻⁶,预想故障开断平衡机时根据电压等级最高、容量最大的原则选择新平衡机。

3.1 IEEE 14 节点测试系统

IEEE 14 节点测试系统的拓扑结构如图 2 所示。对于图 2 中采用虚线表示的线路,其长期允许载流量设为 100 MVA,其余支路的长期允许载流量均设为 50 MVA。测试中,各节点的电压允许运行区间均取为 0.94~1.06(标么值),支路短时允许载流量设为长期允许载流量的 1.3 倍,取支路容量的 95% 作为有功潮流限值。发电机的成本曲线采用二次函数描述,其参数如表 1 所示。

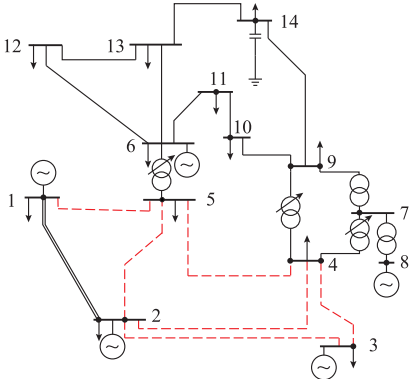


图 2 IEEE 14 节点测试系统拓扑 Fig.2 Topology of IEEE 14-bus test system

表 1 发电机参数
Table 1 Parameters of generators

节点					成本曲线		
	有功 下限/ MW	有功 上限/ MW	无功 下限/ Mvar	无功 上限/ Mvar	常数 项/ 美元 (MW·h) ⁻¹	一次项/ (美元· (MW·h) ⁻²)	二次项/ (美元· (MW·h) ⁻²)
1	0	300	0	10	0	10	0.043
2	0	150	-40	50	0	20	0.250
3	0	100	0	40	0	40	0.010
6	0	100	-6	24	0	40	0.010
8	0	100	-6	24	0	40	0.010

由图 2 可以看出,IEEE 14 节点测试系统的并联支路较少,仅节点 1-2 之间存在 2 条并联线路。由于这 2 条支路的参数完全相同,故其分支系数均为 0.5,且这 2 条支路中任一条支路不越限,则另一条支路也不会越限,故可任选其中一条支路进行监视,这事实上是根据式(12)或式(14)选择监视支路的特例。

为帮助理解故障态约束过滤过程,表 2 给出了节点 2 母线故障时采用直流法求解得到的部分潮流转移关系及约束过滤说明。表中, P_{mn} 表示支路 m - n 的节点 m 侧流入支路的基态有功潮流。

表 2 IEEE 14 节点测试系统潮流转移关系及约束过滤
Table 2 Power transfer relations and constraints filtering on IEEE 14-bus test system

支路	潮流转移关系	$\bar{P}_{Bj}^k$ / MW	短时允许 载流量/MW	是否参 与优化
1-5	$P_{15} + P_{23} + P_{24} + P_{25}$	380.000	123.50	是
4-5	$P_{45} - 0.945 \ 4P_{23} - 0.945 \ 4P_{24}$	274.627	123.50	是
5-6	$P_{56} + 0.054 \ 6P_{23} + 0.054 \ 6P_{24}$	57.873	61.75	否

从表 2 可以看出,对于支路 1-5,其故障态有功潮流可描述为支路 1-5,2-3,2-4 及 2-5 的基态有功潮流 $P_{15}, P_{23}, P_{24}, P_{25}$ 之和。由于 SCOPF 模型中考虑了支路基态潮流小于其长期允许载流量的约束(即式(7)),故支路 1-5 的故障态潮流小于对应的上界 $\bar{P}_{Bj}^k$ (即潮流转移关系中各系数取绝对值,且各支路基态功率替换为其长期载流量得到的值),由于支路 1-5 的 $\bar{P}_{Bj}^k$ 值 380 MW 大于其短时允许载流量 123.5 MW,故其短时过载能力约束不是冗余约束,需要添加到优化模型中。对于支路 5-6,根据其潮流转移关系可获得其可能潮流上界 $\bar{P}_{Bj}^k$ 值为 57.873 MW,小于短时允许载流量 61.75 MW,由于 SCOPF 模型中考虑了基态潮流约束,在 SCOPF 问题的基态可行域内,节点 2 母线开断后支路 5-6 的有功潮流不可能超过其上界 57.873 MW,因而更不可能超过其短时允许载流量 61.75 MW,故支路 5-6 的故障后潮流约束为冗余约束,式(17)的潮流转移

关系及式(18)的短时允许载流量约束均没有必要加入优化模型中。

考虑到 IEEE 14 节点测试系统中线路的 R/X 比值较大(支路 12-13 的比值约为 1.1),与输电网中线路 R/X 比值较小的特征不符,对 IEEE 14 节点测试系统中各支路的电阻均乘以 0.2,构成 IEEE 14 节点修正系统。表 3 给出了 IEEE 14 节点测试系统及 IEEE 14 节点修正系统的 SCOPF 仿真计算结果。表中,TACSCOPF 表示传统的交流 SCOPF^[7],即直接采用故障态交流潮流约束描述的 SCOPF,在本文中作为 SCOPF 问题的精确解;UDCTRSCOPF 表示采用直流潮流法计算潮流转移关系,并采用系数 0.01 对潮流转移比进行过滤的 SCOPF;DCTRSCOPF 表示采用直流潮流法计算潮流转移关系,并采用本文方法进行约束缩减的 SCOPF;ACTRSCOPF 表示采用交流潮流法计算潮流转移关系,并采用本文方法进行约束缩减的 SCOPF,后缀的数字表示外循环迭代次数;转移关系数表示本次 SCOPF 计算时未被过滤掉的,参与 SCOPF 计算的转移关系数量。

表 3 IEEE 14 节点测试系统及
IEEE 14 节点修正系统仿真计算结果
Table 3 Simulation results of IEEE 14-bus test
system and IEEE 14-bus modified system

求解 方法	预想 故障 数	IEEE 14 节点 测试系统		IEEE 14 节点 修正系统	
		转移 关系 数	发电费用/ (美元·h ⁻¹)	转移 关系 数	发电费用/ (美元·h ⁻¹)
TACSCOPF	35		7 409.50		7 258.59
UDCTRSCOPF	35	533	7 349.77	531	7 246.17
DCTRSCOPF	35	162	7 349.72	166	7 246.13
ACTRSCOPF1	35	169	7 573.10	168	7 278.11
ACTRSCOPF2	35	178	7 402.39	157	7 258.56
ACTRSCOPF3	35	146	7 411.11	157	7 258.79

比较表 3 第 3,4 行可以看出,UDCTRSCOPF 和 DCTRSCOPF 的目标函数值偏差极小,由此说明约束过滤对优化结果几乎没有影响。

由表 3 第 2,3,5 列可以看出:
①UDCTRSCOPF 平均每个预想故障包含约 15 条潮流转移关系约束,与 IEEE 14 节点测试系统的支路数 21 相比,参与优化计算的比例约为 71%;
②采用本文约束缩减方法, DCTRSCOPF 及各 ACTRSCOPF 中平均每个预想故障包含约 5 条潮流转移关系约束,参与优化计算的比例约为 24% (由于 IEEE 14 节点测试系统中并联线路及并列主变压器较少,仅节点 1-2 之间存在 2 条并联支路,该比例相对较大,实际系统参与优化的约束比例要小

得多)。

由表 3 第 1, 4, 6 列可以看出,采用同样的 SCOPF 模型,IEEE 14 节点测试系统的偏差明显大于 IEEE 14 节点修正系统,其原因在于 IEEE 14 节点测试系统的 R/X 比值较大,有功损耗的非线性导致潮流转移关系的近似误差较大。

比较表 3 第 2, 6, 7 行可以看出:对 ACTRSCOPF 引入外循环,有助于提高 SCOPF 问题的求解精度。即使对 IEEE 14 节点测试系统这样一个 R/X 比值较大的系统,进行 2 到 3 次外循环就能够达到较高的计算精度,能够满足工程应用要求。

3.2 华东电网仿真测试

为了测试本文所提 SCOPF 模型的求解效率及约束过滤效果,对华东电网 2017 年夏季高峰运行方式进行了仿真测试。

该方式下华东电网共有 6 355 个节点和 10 108 条支路。采用本文 2.1 节提出的监视支路选择方法能够将支路划分为 4 529 个设备组,故只需对 4 529 条支路进行监视,能够有效减小 SCOPF 问题的计算规模。

测试中考虑 2 种典型应用场景:①华东电网应用场景,优化范围为 500 kV 电厂,监视支路为 500 kV 及以上的线路及主变压器,故障集包括 500 kV 及以上线路及主变压器 $N-1$ 故障;②省级电网应用场景,优化范围为省内 220 kV 及以上电厂,监视支路为省内 220 kV 及以上线路及主变压器,故障集包括省内 220 kV 及以上线路及主变压器 $N-1$ 故障,以及 220 kV 母线 $N-1$ 故障。附录 A 表 A1 给出了 2 种典型场景下华东电网 SCOPF 的仿真计算结果。

对 2 种典型应用场景下的各算例,由附录 A 表 A1 可以得到以下结论。

1) DCTRSCOPF 和 UDCTRSCOPF 的目标函数值偏差极小,约束缩减对优化结果几乎没有影响,但能够明显缩小计算规模,在计算速度上的优势明显。

2) DCTRSCOPF 给出的目标函数值与 ACTRSCOPF3 的偏差均小于 2%,可以适用于精度要求不太高的场合。

3) ACTRSCOPF2 给出的目标函数值与 ACTRSCOPF3 的偏差均小于 0.1%,对 ACTRSCOPF 引入外循环迭代的收敛速度快,2~3 次迭代就能够达到很高的收敛精度。

4) TACSCOPF 优化成功的情况下,目标函数

值与 ACTRSCOPF3 的偏差均小于 0.5%,说明潮流转移关系约束能够较好地描述故障后支路有功潮流约束。

5) 预想故障集规模较大时, TACSCOPF 的计算规模巨大、计算时间长、占用内存空间大,难以满足实际大电网的应用要求。

6) 单次 DCTRSCOPF 或 ACTRSCOPF 的计算时间均为秒级,其计算效率能够满足实际大区电网或省级电网的应用要求。

4 结论

本文提出了基于潮流转移关系的 SCOPF 实用模型及故障态约束缩减方法,采用 IEEE 14 节点测试系统和华东电网进行了仿真验证,主要结论如下。

1) 潮流转移关系能够较好地描述预想故障前后的支路有功潮流变化关系,精度上满足 SCOPF 问题的工程应用要求。

2) 监视支路选择及故障态约束筛选能够在不影响计算精度的同时,大幅削减 SCOPF 问题的计算规模,提高求解效率。

3) 采用原对偶内点法求解所提 SCOPF 实用模型具有较好的计算效率,能够满足实际大电网应用的性能要求。

本文采用的 SCOPF 模型主要关注故障态支路有功潮流约束,没有考虑故障态电压幅值约束,综合考虑故障态支路潮流及电压幅值约束的 SCOPF 模型及高效求解算法仍有待进一步研究。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

[1] 于尔铿,刘广一,周京阳,等.能量管理系统(EMS)[M].北京:科学出版社,2001:75-78.

[2] 马瑞,陶俊娜,徐慧明.基于潮流转移因子的电力系统连锁跳闸风险评估[J].电力系统自动化,2008,32(12):17-21.

MA Rui, TAO Junna, XU Huiming. Power flow transfer factor based risk assessment of power system cascading trips[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 17-21.

[3] 钟世民,韩学山,刘道伟,等.计及校正控制的安全约束最优潮流的奔德斯分解算法[J].中国电机工程学报,2011,31(1):65-71.

ZHONG Shimin, HAN Xueshan, LIU Daowei, et al. Benders decomposition algorithm for corrective security-constrained optimal power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 65-71.

[4] 晏鸣宇,何宇斌,文劲宇,等.考虑柔性交流输电系统设备控制的校正型安全约束最优潮流[J].电力系统自动化,2017,41(12):63-69.DOI:10.7500/AEPS20161222007.

- YAN Mingyu, HE Yubin, WEN Jinyu, et al. Corrective security-constrained optimal power flow with control of flexible AC transmission system devices[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 63-69. DOI: 10.7500/AEPS20161222007.
- [5] 李捷,王鹏,杨林峰.预想事故安全约束最优潮流问题的并行多中心校正内点算法[J].微电子学与计算机, 2014, 31(2): 137-141.
- LI Jie, WANG Peng, YANG Linfeng. Parallel multiple centrality correctors interior point method for ESC-OPF[J]. Microelectronics & Computer, 2014, 31(2): 137-141.
- [6] 李尹,张伯明,孙宏斌,等.基于非线性内点法的安全约束最优潮流:(一)理论分析[J].电力系统自动化, 2007, 31(19): 7-13.
- LI Yin, ZHANG Boming, SUN Hongbin, et al. Security constrained optimal power flow based on nonlinear interior point method: Part one theory analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 7-13.
- [7] 李尹,张伯明,孙宏斌,等.基于非线性内点法的安全约束最优潮流:(二)算法实现[J].电力系统自动化, 2007, 31(20): 6-11.
- LI Yin, ZHANG Boming, SUN Hongbin, et al. Security constrained optimal power flow based on nonlinear interior point method: Part two implementation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(20): 6-11.
- [8] 汪超群,韦化,吴思缘.基于风险控制PSCOPF改进模型及交替迭代算法[J].电力自动化设备, 2017, 37(4): 114-121.
- WANG Chaoqun, WEI Hua, WU Siyuan. Improved PSCOPF model based on risk management and alternative iteration algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 114-121.
- [9] 傅志生,白晓清,李佩杰,等.一种快速求解大规模安全约束最优潮流的多核并行方法[J].电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 29-37.
- FU Zhisheng, BAI Xiaoqing, LI Peijie, et al. A high-speed multi-core parallel method for solving large-scale security constrained OPF[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 29-37.
- [10] 何宇斌,文云峰,戴赛,等.基于故障风险指标排序的安全约束最优潮流[J].电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 52-59.
- HE Yubin, WEN Yunfeng, DAI Sai, et al. Security-constrained optimal power flow based on risk ranking of contingencies[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 52-59.
- [11] WIGET R, IGGLAND E, ANDERSSON G. Security constrained optimal power flow for HVAC and HVDC grids[C]// Power Systems Computation Conference (PSCC), August 18-22, 2014, Wroclaw, Poland.
- [12] 徐泰山,鲍颜红,苏寅生,等.暂态稳定断面功率极限区间和关联度指标计算[J].电力系统自动化, 2016, 40(20): 154-160. DOI:10.7500/AEPS20160120012.
- XU Taishan, BAO Yanhong, SU Yinsheng, et al. Calculation of power limit interval and correlation degree for transient stability section[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 154-160. DOI: 10.7500/AEPS20160120012.
- [13] 方勇杰,崔晓丹,王胜明,等.暂态稳定极限耦合的多个输电断面极限功率协调计算[J].电力系统自动化, 2015, 39(22): 53-58. DOI:10.7500/AEPS20150205004.
- FANG Yongjie, CUI Xiaodan, WANG Shengming, et al. Coordinated limit power calculation of multi-sections with transient stability limit coupling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 53-58. DOI: 10.7500/AEPS20150205004.
- [14] 陈伟,郭瑞鹏,叶琳,等.电网断面热稳定限额计算模型及方法[J].电力系统自动化, 2012, 36(17): 20-24.
- CHEN Yi, GUO Ruipeng, YE Lin, et al. Calculation model and method for thermal stability control limit to transmission interfaces in a power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 20-24.
- [15] 赵娟,申旭辉,吴丽华,等.结合直流潮流模型的电网断面热稳定极限快速评估方法[J].电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 97-101.
- ZHAO Juan, SHEN Xuhui, WU Lihua, et al. Fast evaluation method on thermal stability limit of power grid cross-section with DC power flow model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 97-101.
- [16] 罗彬,李刚,苗树敏,等.大规模电力系统潮流转移比多核并行批处理方法[J].中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5446-5454.
- LUO Bin, LI Gang, MIAO Shumin, et al. A parallel batch method for power flow transferring analysis in large-scale power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5446-5454.
- [17] 李传栋,张逸,杨桂钟,等.基于故障影响域的多重预想故障集筛选方法[J].电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 92-99.
- LI Chuandong, ZHANG Yi, YANG Guizhong, et al. An anticipated multi-contingencies selection method based on fault influence domain[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 92-99.
- [18] GRANVILLE S. Optimal reactive dispatch through interior point methods[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 136-146.

郭瑞鹏(1972—),男,通信作者,博士,副研究员,主要研究方向:电力系统状态估计、可靠性评估、最优化技术及其在电力系统中的应用等。E-mail: eegrp@zju.edu.cn

边麟龙(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统优化运行、电力系统最优潮流等。E-mail: 1359281397@qq.com

宋少群(1979—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:电网稳定运行管理。E-mail: blackducks@126.com

(编辑 章黎)

Practical Model of Security Constrained Optimal Power Flow and Reduction Methods for Contingency Constraints

GUO Ruipeng¹, BIAN Linlong¹, SONG Shaoqun², YU Xiuyue², TANG Wei³, YANG Cheng³

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Fujian Electric Power Dispatch & Control Center, Fuzhou 350003, China;

3. State Grid Anhui Electric Power Dispatch & Control Center, Hefei 230022, China)

Abstract: Security constrained optimal power flow (SCOPF) for large-scale power systems is a complex and difficult problem with its highly demanding computational requirements. A practical SCOPF model is presented based on power flow transfer relations and related constraint reduction methods are proposed. According to the power flow transfer relations established by contingency analysis, the active power flows on branches in post-contingency state can be described as linear functions of those in pre-contingency state. Therefore, the active power flow constraints of the branches in post-contingency state are described by the reformed linear inequality constraints of the active power flows of the branches in pre-contingency state. Furthermore, by grouping the parallel lines and parallel transformers, the number of monitored branches is reduced by using the distribution relations of active power flows in grouped branches. Finally, since the short-term capacity of power equipment is usually much greater than the long-term capacity, the power flow constraints of the branches in post-contingency state are accordingly screened to reduce the scale of SCOPF problem as much as possible. Simulations on the IEEE 14-bus test system and the East China power grid verify the correctness and effectiveness of the proposed SCOPF model and the constraint reduction methods.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2017YFB0902800).

Key words: contingency; power transfer relations; security constrained optimal power flow; primal-dual interior point method; constraints reduction method