

基于风险控制的 PSCOPF 改进模型及交替迭代算法

汪超群, 韦 化, 吴思缘

(广西大学 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要: 计算效率低和计算结果过于保守是困扰传统预防性安全约束最优潮流(PSCOPF)应用的 2 个关键难题。针对这些问题,提出一种新的具有可控风险度的改进模型及交替迭代算法。根据电力系统实际运行控制存在偏差的特点,在发电机有功和无功源电压等变量的基础上引入偏差量;以偏差量的平方和最小作为综合风险指标,构造电压互补约束,将原始大规模 PSCOPF 问题分解为故障数较少的 PSCOPF 和约束潮流 2 个子问题。子问题之间采用交替迭代的方式计算,获得不可控故障集和可控故障集,进而得到整个问题的解。IEEE 118、300 节点标准系统和某 703 节点、241 个预想故障实际系统的测试结果表明,所提模型及算法在不降低系统安全性的前提下具有良好的经济性和较高的计算效率;与传统模型的集中式计算方法相比,其占用内存可减少 80%,串行和并行加速效果分别在 5 倍和 10 倍以上。

关键词: 预防性安全约束; 最优潮流; 风险控制; 交替迭代; 约束潮流; 并行计算; 模型

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.017

0 引言

自1962年法国电力工程师 Carpentier 提出最优潮流^[1] OPF (Optimal Power Flow) 的概念以来,OPF 一直为业界所关注并成为电力系统规划运行不可或缺的工具之一。随着研究的深入和具体工程应用的展开,传统 OPF 模型自身存在的诸多不足之处也逐渐暴露出来,并衍生出一系列新的分支^[2-5]。这其中考虑多预想故障的安全约束最优潮流^[6-7] SCOPF (Security-Constrained Optimal Power Flow) 占据着举足轻重的地位。与传统 OPF 相比,SCOPF 是一个更富有挑战、更具有实际意义的课题。事实上,由于 SCOPF 考虑了设备故障对系统安全的影响,其求解规模较 OPF 大几十倍甚至上百倍,因此如何提高 SCOPF 的求解速度并降低对内存的要求是一个十分值得研究的问题。

SCOPF 可分为预防性安全约束最优潮流^[6] PSCOPF (Preventive Security-Constrained Optimal Power Flow) 和校正性安全约束最优潮流^[7] CSC-OPF (Corrective Security-Constrained Optimal Power Flow)。两者之间的区别在于 PSCOPF 不考虑故障后系统的调节能力(如发电机有功出力、变压器分接头等),而是将故障状态的控制变量与正常状态的控制变量严格保持一致。因此,PSCOPF 相比 CSCOPF 更为安全,但同时也付出了经济性的代价。

目前,有关 PSCOPF 的研究主要围绕算法的计算速度展开,研究内容大致可分为以下 3 类。

a. 构造线性模型代替非线性模型的求解。其主要思路是用功率平衡方程近似潮流方程并基于线性分段技术表示目标函数^[8]。由于不考虑电压和无功等运行约束,这种处理方式得到的结果是存疑的,尤其是在系统负荷较重的情况下^[9]。

b. 利用故障筛选与排序技术缩减故障集规模^[9-10]。常用的故障排序指标包括故障状态下等式和不等式约束的拉格朗日乘子、故障状态与正常状态目标函数的比值以及约束越限量的大小等。由于以上指标均建立在假设的基础上,且相关参数的选取缺乏统一标准,经常会导致漏选现象的产生,致使 PSCOPF 的迭代次数增多,进而降低算法的计算效率。

c. 采用分解/并行技术加速问题的求解。针对 PSCOPF 形成的修正矩阵具有分块对角加边形式 BBDF (Bordered Block Diagonal Form) 的特征,文献[11]提出以“分解-协调”的方式进行计算。鉴于该算法在迭代过程中要求解大量的矩阵方程和线性方程,需消耗过多的内存,其总体计算效率并不高。文献[12]采用有向无环图^[13] DAG (Directed Acyclic Graph) 多核并行技术对修正矩阵的 Cholesky 分解进行细粒度解耦并行,使求解速度有所提高。文献[14]基于广义 Benders 算法^[15]将 PSCOPF 原问题分解为一个 OPF 主问题和多个预想故障状态子问题。主问题产生正常状态的解,子问题负责校验解的可行性并将结果以 Benders 割的形式返回到主问题。考虑到 Benders 算法对分解的子问题数较为敏感,随着故障数增多和系统规模扩大,其迭代次数也急剧

收稿日期:2016-07-31;修回日期:2017-01-06

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB228205);国家自然科学基金资助项目(51167001)

Project supported by the National Key Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB228205) and the National Natural Science Foundation of China(51167001)

增加,因此该方法只适用于求解规模较小的 PSCOPF 问题。

本文提出一种快速求解大规模 PSCOPF 问题的方法。该方法在原始 PSCOPF 精确模型的基础上引入偏差量和交替迭代策略,在兼顾系统安全性的前提下减弱了故障状态和正常状态之间的耦合度,从而改善了经济性和计算速度。针对该方法首次迭代产生的不可控故障数较多的现象,提出改进措施,进一步提高了计算效率。整个模型结构简单,易于并行化处理。在获取计算结果的同时,该模型可以自主实现对系统风险水平的控制,从而在经济性和安全性之间取得良好的平衡。为了验证本文所提模型及算法的正确性和有效性,分别采用集中式内点法、基于分块对角加边矩阵的分解协调算法、基于有向无环图的并行数值分解方法以及广义 Benders 分解算法进行对比分析。分析结果表明所提模型及算法不仅显著地减小了占用内存,极大地提高了求解速度,而且对于 SCOPF 的工程应用具有一定的参考价值。

1 PSCOPF 的数学模型

PSCOPF 的数学模型一般可简写为如下形式^[9]:

$$\begin{aligned} \min & f(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \\ \text{s.t. } & \mathbf{h}_0(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = 0 \\ & \mathbf{g}_0(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \geq 0 \\ & \mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) = 0 \quad k=1, 2, \dots, c \\ & \mathbf{g}_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \geq 0 \quad k=1, 2, \dots, c \end{aligned} \quad (1)$$

其中, c 为故障数;下标 0 表示正常状态;下标 k 表示故障状态; $\mathbf{x}_k$ 为状态变量; $\mathbf{u}_0$ 为由正常状态 OPF 所确定的并在故障状态下保持不变的量,一般取发电机有功出力(除参考节点外)和无功源节点电压幅值; f 为目标函数; $\mathbf{h}$ 为等式约束矢量; $\mathbf{g}$ 为不等式约束矢量。

下面给出式(1)的具体表达形式^[16]。

a. 目标函数。

以系统运行成本最小为目标函数,其表达式为:

$$f(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \sum_{i \in S_G} [a_{2i}(P_{Gi}^0)^2 + a_{1i}P_{Gi}^0 + a_{0i}] \quad (2)$$

其中, $P_{Gi}^0 (i \in S_G)$ 为节点 i 处的发电机在正常状态下的有功出力; S_G 为所有发电机集合; a_{2i}, a_{1i}, a_{0i} 分别为发电机耗量特性参数的二次项、一次项和常数项。

b. 等式约束。

$$\mathbf{h}_0(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{cases} U_i^0 \sum_{j=1}^n U_j^0 Y_{ij}^0 \cos \delta_{ij}^0 - P_{Gi}^0 + P_{Di}^0 = 0 & i \in S_N \\ U_i^0 \sum_{j=1}^n U_j^0 Y_{ij}^0 \sin \delta_{ij}^0 - Q_{Ri}^0 + Q_{Di}^0 = 0 & i \in S_N \\ \theta_i^0 = 0 & i \in S_\theta \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) =$$

$$\begin{cases} U_i^k \sum_{j=1}^n U_j^k Y_{ij}^k \cos \delta_{ij}^k - P_{Gi}^0 + P_{Di}^0 = 0 & i \notin S_\theta \\ U_i^k \sum_{j=1}^n U_j^k Y_{ij}^k \cos \delta_{ij}^k - P_{Gi}^k + P_{Di}^0 = 0 & i \in S_\theta \\ U_i^k \sum_{j=1}^n U_j^k Y_{ij}^k \sin \delta_{ij}^k - Q_{Ri}^0 + Q_{Di}^0 = 0 & i \in S_{PQ} \\ U_i^k \sum_{j=1}^n U_j^k Y_{ij}^k \sin \delta_{ij}^k - Q_{Ri}^k + Q_{Di}^0 = 0 & i \in S_R \\ U_i^0 = U_i^k & i \in S_R \\ \theta_i^k = 0 & i \in S_\theta \end{cases} \quad (4)$$

c. 不等式约束。

$$\mathbf{g}_0(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{cases} \underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi}^0 \leq \overline{P}_{Gi} & i \in S_G \\ \underline{Q}_{Ri} \leq Q_{Ri}^0 \leq \overline{Q}_{Ri} & i \in S_R \\ \underline{U}_i \leq U_i^0 \leq \overline{U}_i & i \in S_N \\ \underline{P}_{ij} \leq P_{ij}^0 \leq \overline{P}_{ij} & (i, j) \in S_L \end{cases} \quad (5)$$

$$\mathbf{g}_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) = \begin{cases} \underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi}^k \leq \overline{P}_{Gi} & i \in S_\theta \\ \underline{Q}_{Ri} \leq Q_{Ri}^k \leq \overline{Q}_{Ri} & i \in S_R \\ \underline{U}_i \leq U_i^k \leq \overline{U}_i & i \in S_N \\ \underline{P}_{ij} \leq P_{ij}^k \leq \overline{P}_{ij} & (i, j) \in S_L \end{cases} \quad (6)$$

其中, $S_\theta, S_G, S_R, S_{PQ}, S_N$ 和 S_L 分别为参考节点、发电机节点、无功源节点、负荷节点、系统全部节点和联络线集合; $U_i \angle \theta_i$ 为节点 i 的电压相量; $Y_{ij} \angle \alpha_{ij}$ 为节点导纳矩阵第 i 行第 j 列元素; $\delta_{ij} = \theta_i - \theta_j - \alpha_{ij}$; $P_{ij} = -U_i^2 Y_{ij} \cos \alpha_{ij} + U_i U_j \cos \delta_{ij}$ 为线路 (i, j) 传输有功; P_{Gi}, Q_{Ri} 分别为节点 i 的有功和无功源出力; P_{Di}, Q_{Di} 分别为节点 i 的有功和无功负荷; $(\overline{\cdot}), (\underline{\cdot})$ 分别表示变量或者函数的上界和下界;上标 0 代表正常状态;上标 k 表示故障状态, $k=1, 2, \dots, c$ 。

由式(2)~(6)知, PSCOPF 的求解规模约为常规 OPF 的 $c+1$ 倍, 对应既约修正矩阵的维数为 $(c+1)^2$ 倍。易知, 当故障数 c 较多、系统规模较大时, 传统集中式的计算方法已很难满足要求。

2 模型及算法

2.1 基本思路

为便于说明, 引入故障状态下的控制变量 $\mathbf{u}_k$, 将模型式(1)等价表示为如下形式:

$$\begin{aligned} \min & f(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \\ \text{s.t. } & \mathbf{h}_0(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = 0 \\ & \mathbf{g}_0(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \geq 0 \\ & \mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) = 0 \\ & \mathbf{g}_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \geq 0 \\ & \mathbf{u}_k = \mathbf{u}_0 \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{u}_k (k=1, 2, \dots, c)$ 为故障 k 的控制变量。

由式(7)可知,正常状态和故障状态通过等式紧密耦合在一起;其次, $\mathbf{u}_k=\mathbf{u}_0(k=1,2,\dots,c)$ 严格成立使系统的经济性严重降低。换言之,系统为实现正常状态与 c 个故障状态下的控制变量完全一致,需要借助各种控制手段,调整运行方式,而这都是以提高系统的运行成本为代价的。

在电力系统实际运行中,存在以下基本事实:各种控制设备都留有一定的裕度;系统允许存在较小的控制偏差,即正常状态和故障状态下的控制变量可不完全一致;故障状态下系统对参数的要求较正常状态更为宽泛,例如允许电压的波动幅度较大。基于以上事实,不妨令 $\mathbf{u}_k=\tilde{\mathbf{u}}_0+\Delta\mathbf{u}_k$, 其中 $\tilde{\mathbf{u}}_0$ 为已知初始值(由正常状态 OPF 得到), $\Delta\mathbf{u}_k$ 为故障 k 的控制变量偏差。当 $\Delta\mathbf{u}_k\rightarrow 0$ 或某个较小阈值并满足该故障状态下的其他约束时,则认为故障 k 是满足问题式(1)的,称故障 k 为可控故障。此时该故障可不计入问题式(1)进行求解;反之,称故障 k 为不可控故障,并将其纳入问题式(1)的故障集中。当所有故障按照上述原则校验一遍之后,分别得到可控和不可控故障集。然后将不可控故障集代入问题式(1)中修正 $\tilde{\mathbf{u}}_0$ 的值,重新校验可控故障集,直至没有新的不可控故障产生,迭代收敛。由于问题式(1)的不可控故障数一般远小于原问题的故障总数(约占总数的 $1/6\sim 1/5$)且校验的过程可并行实现,从而达到提高计算速度和降低系统成本的目的。

$$\begin{aligned} \min \quad & \Delta\mathbf{u}_k^T\Delta\mathbf{u}_k \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k, \tilde{\mathbf{u}}_0+\Delta\mathbf{u}_k)=0 \\ & \mathbf{g}_k(\mathbf{x}_k, \tilde{\mathbf{u}}_0+\Delta\mathbf{u}_k)\geq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

校验故障 k 是否为可控故障的过程相当于求解子问题式(8)。当目标函数值 $\Delta\mathbf{u}_k^T\Delta\mathbf{u}_k<\varepsilon$ 时,故障 k 即为可控故障。本文定义 ε 为误差精度或风险程度,该指标代表系统为提高经济性而愿意承担的危险程度,一般取很小的数值,因此并不会降低系统的安全性。根据对系统经济性的要求,选取大小不同的指标,进而实现系统风险的自主可控。特别地,当 $\varepsilon=0$ 时,所有故障均为不可控故障,分解的 2 个子问题等价于原 PSCOPF 问题;当 ε 取值较大时,这 2 个子问题则等价于校正控制 CSCOPF 问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{h}_0(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)=0 \\ & \mathbf{g}_0(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)\geq 0 \\ & \mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)=0 \\ & \mathbf{g}_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)\geq 0 \\ & |\mathbf{u}_k-\mathbf{u}_0|\leq \Delta\bar{\mathbf{u}}_k \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $\Delta\bar{\mathbf{u}}_k=t\times d\mathbf{u}_k/dt$ 为故障 k 发生后控制变量 $\mathbf{u}_k$ 在时间 t 内的最大允许调节量; $|\cdot|$ 为变量的绝对值。

2.2 具体模型

由 2.1 节可知,传统 PSCOPF 问题可分为 2 个子问题,分别为规模较小的 PSCOPF 问题式(1)和问题式(8),对应的具体模型分别是式(2)—(6)和式(10)—(20)。

$$\min \sum_{i\in S_G} (\Delta P_{Gi}^k)^2 + \sum_{i\in S_R} (\Delta U_{Gai}^k)^2 + \sum_{i\in S_R} (\Delta U_{Gbi}^k)^2 \quad (10)$$

$$\text{s.t.} \quad P_i^k(\cdot) - (P_{Gi}^0 + \Delta P_{Gi}^k) + P_{Di}^0 = 0 \quad i\in S_N \quad (11)$$

$$Q_i^k(\cdot) - Q_{Ri}^k + Q_{Di}^0 = 0 \quad i\in S_N \quad (12)$$

$$U_{Gi}^k - U_{Gi}^0 - \Delta U_{Gai}^k + \Delta U_{Gbi}^k = 0 \quad i\in S_R \quad (13)$$

$$0 \leq (Q_{Ri}^k - \underline{Q}_{Ri}) \perp \Delta U_{Gai}^k \geq 0 \quad i\in S_R \quad (14)$$

$$0 \leq (\bar{Q}_{Ri} - Q_{Ri}^k) \perp \Delta U_{Gbi}^k \geq 0 \quad i\in S_R \quad (15)$$

$$\underline{Q}_{Ri} \leq Q_{Ri}^k \leq \bar{Q}_{Ri} \quad i\in S_R \quad (16)$$

$$\underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi}^k \leq \bar{P}_{Gi} \quad i\in S_{\theta} \quad (17)$$

$$\underline{P}_{ij} \leq P_{ij}^k \leq \bar{P}_{ij} \quad i\in S_L \quad (18)$$

$$\underline{U}_i \leq U_i^k \leq \bar{U}_i \quad i\in S_N \quad (19)$$

$$\theta_k=0, \Delta U_{Gai} \geq 0, \Delta U_{Gbi} \geq 0 \quad k\in S_{\theta}, i\in S_R \quad (20)$$

其中, $P_i^k(\cdot)$ 、 $Q_i^k(\cdot)$ 分别为节点 i 处有功和无功潮流方程的简写形式; P_{Gi}^0 、 U_{Gi}^0 是由子问题式(2)—(6)计算出的定值,分别为发电机有功(除参考节点)和无功源节点电压幅值; ΔP_{Gi}^k 、 ΔU_{Gai}^k 和 ΔU_{Gbi}^k 为对应的偏差量;“ $\perp$ ”表示互补条件。式(10)—(20)为故障 k 的约束潮流子问题,其中目标函数为控制变量偏差的平方和最小。在实际应用中互补条件式(14)和(15)可表示为如下形式^[17]:

$$-\varepsilon_{\text{comp}} \leq (Q_{Ri}^k - \underline{Q}_{Ri}) \Delta U_{Gai}^k \leq \varepsilon_{\text{comp}} \quad i\in S_R \quad (21)$$

$$-\varepsilon_{\text{comp}} \leq (\bar{Q}_{Ri} - Q_{Ri}^k) \Delta U_{Gbi}^k \leq \varepsilon_{\text{comp}} \quad i\in S_R \quad (22)$$

其中, $\varepsilon_{\text{comp}}$ 为正数,代表互补误差精度。

式(21)、(22)的主要作用是考虑无功越限时电压幅值不能维持在给定值 U_{G0}^0 的情况,目的是保证该子问题始终有解:

a. 当 $\underline{Q}_{Ri} \leq Q_{Ri}^k \leq \bar{Q}_{Ri}$ 时,由 $\Delta U_{Gai}^k = \Delta U_{Gbi}^k = 0$ 可知 $U_{Gi}^k = U_{Gi}^0$;

b. 当 Q_{Ri}^k 达到上限 $\bar{Q}_{Ri}$ 时,由 $\Delta U_{Gai}^k = 0$ 、 $\Delta U_{Gbi}^k > 0$ 可知 $U_{Gi}^k = U_{Gi}^0 - \Delta U_{Gbi}^k$ 小于给定电压 U_{Gi}^0 ;

c. 当 Q_{Ri}^k 达到下限 $\underline{Q}_{Ri}$ 时,由 $\Delta U_{Gai}^k > 0$ 、 $\Delta U_{Gbi}^k = 0$ 可知 $U_{Gi}^k = U_{Gi}^0 + \Delta U_{Gai}^k$ 大于给定电压 U_{Gi}^0 。

2.3 算法流程及改进

基于以上所述思想,给出算法流程如下。

a. 令不可控故障集 C_E 为空,计算含故障集 C_S (初次迭代 C_S 为空集,相当于解 OPF)的 PSCOPF 子问题式(2)—(6),得到状态变量 $\mathbf{x}_0$ 和控制变量 $\mathbf{u}_0$ 。

b. 在 $\mathbf{u}_0$ 处将故障集 $C_{NS} = \{k \in C, k \notin C_S\}$ (C 为所有故障的集合)中的故障逐个代入约束潮流子问题式(10)—(20)中校验,得到不可控故障集 C_E 。

c. 若 C_E 为空集,则 $\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0$ 即为当前最优解,输出并退出循环;否则取 $C_S = C_S \cup C_E$,返回步骤 a。

上述步骤可以用图 1 表示。易知,PSCOPF 问题的解由子问题之间交替迭代得到,称该算法为交替迭代算法。

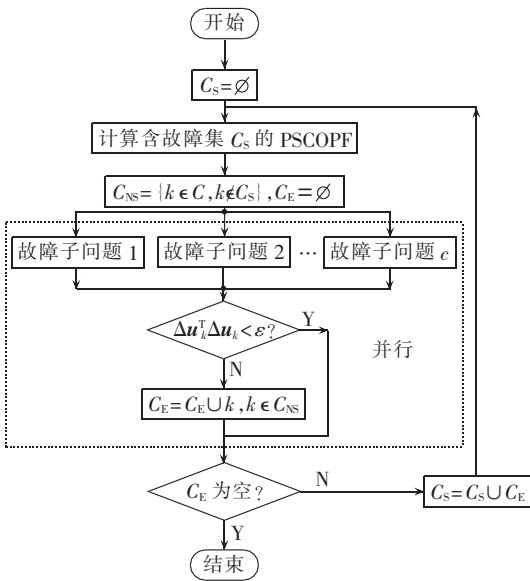


图 1 交替迭代算法流程图

Fig.1 Flowchart of alternative iteration algorithm

大量的算例测试结果表明,本文所提算法一般只需迭代 2~4 次,且第一次迭代即可筛选出绝大部分不可控故障。事实上,在第一次迭代筛选的不可控故障集 C_E 中有相当一部分故障非常接近校验阈值(风险度),而这部分故障在随后的迭代中应属于可控故障。这是因为随着迭代的进行,不断有新的故障加入不可控故障集中,从而修正了当前解。因此,本文可以选取一个稍大于风险度的近似阈值,在将 C_E 纳入 $C_S(C_S = C_S \cup C_E)$ 之前事先剔除这类故障,从而进一步提高计算效率(称为改进算法)。例如,选定的风险阈值和近似阈值分别为 10^{-4} 和 5×10^{-4} 。在第一次迭代后先将 C_E 中目标函数值小于 5×10^{-4} 的故障滤除,再将 C_E 计入 C_S 中继续迭代。不难得出,选取的近似阈值不宜过大,否则容易造成漏选的故障数过多,相应的迭代次数也会增加。

3 算例测试及分析

选取 IEEE 118、300 节点标准系统和 C703^[2]实

际系统作为测试算例,分别采用集中式内点法(A)、基于分块对角加边矩阵的分解协调算法(B)、基于有向无环图的并行数值分解方法(C)、广义 Benders 分解算法(D)、本文方法(E)以及改进算法(F)进行对比分析。其中,算法 A 即为常规的内点算法^[18]。为突显与分解/并行算法 B—D 的不同,冠以“集中式”^[19]以示区别。算例的基本特征见表 1。实验中使用的计算机是 IBM-PC 兼容机,CPU 型号为 Intel Core i5-3470,主频 3.20 GHz,核心数 4,内存 4.0 GB,软件环境为 MATLAB 2013a,操作系统为 Win7 x86,对偶间隙取 10^{-6} 。

表 1 测试系统的基本特征
Table 1 Basic parameters of test system

参数	IEEE 118	IEEE 300	C703
母线数/支路数	118/201	300/423	703/808
发电机/无功源数	16/54	21/69	55/99
联络线数	177	122	125
故障数	122	147	241
变量数	254664	507107	1698174
既约修正矩阵维数	75084	204003	751526

注:无功源包括发电机、电容器和 SVC 等无功出力装置,联络线数表示线路有功潮流约束个数。

PSCOPF 问题的大规模特性可以从表 1 体现出来。表中对于考虑 241 个预想故障的 C703 系统,其既约修正矩阵维数为 751526,变量数高达 1698174,对该系统采用传统集中式计算方法无疑是十分困难的。

图 2 是 3 个约束潮流子问题的迭代过程,这 3 个子问题分别对应 IEEE 118、300 和 C703 系统中的 3 个故障。从图中可以看出,子问题的目标函数值均小于 10^{-5} ,说明这 3 个故障属于可控故障。

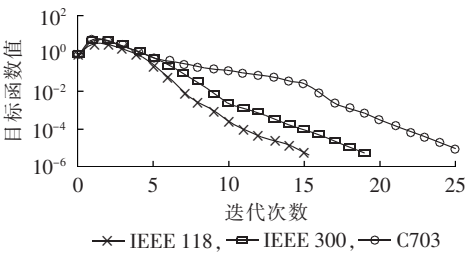


图 2 迭代收敛曲线

Fig.2 Iterative convergence curves

表 2 给出了 6 种算法的计算性能比较。其中风

表 2 6 种算法的性能比较

Table 2 Comparison of performance among six algorithms

系统名称	不可控或越限故障数				迭代次数				串行计算时间/s						并行计算时间/s				
	A/B/C	D	E	F	A/B/C	D	E	F	A	B	C	D	E	F	B	C	D	E	F
IEEE 118	122	10	18	18	42	10	3	3	137.9	*	82.9	92.9	26.4	26.1	*	76.3	26.7	12.4	12.2
IEEE 300	147	23	28	20	43	57	3	3	967.8	*	581.3	1587.6	95.3	84.5	*	516.6	441.5	51.0	35.8
C703	241	—	49	40	*	—	2	2	*	*	*	—	307.8	286.0	*	*	—	176.0	143.9

注:算法 D—F 的迭代次数均指外循环迭代次数。

险度指标取 10^{-4} , 近似阈值为 5×10^{-4} , “*”和“—”的部分分别表示因内存不足(out of memory)和迭代次数超出限制而引起的无法收敛的现象。由该表可知, 算法 B 和算法 C 与算法 A 的迭代次数一致, 这是因为这 2 种方法均未对原修正矩阵做任何近似而是分别采用矩阵变换和并行 Cholesky 分解的方式进行计算。由于 Benders 割是对子问题的线性近似且存在较强的“尾部效应”, 因此当故障数增多时算法 D 的迭代次数也随之相应增加甚至不收敛。与算法 A—C 不同的是, 算法 D—F 具有两层结构, 即交替迭代外循环和子问题求解内循环。对比算法 D, 本文所提方法(E、F)一般迭代 3 次左右, 表现出很强的适应性和稳定性。特别地, 对于节点数和故障数较多的 C703 系统, 仅需迭代 2 次即可收敛, 进一步证明了其良好的收敛性。

对比表 2 中各算法的不可控故障数, 不难发现算法 E 和算法 F 的不可控故障数远小于预想故障总数, 约占总数的 $1/6 \sim 1/5$ 。该特性保证了所提算法的经济性和计算效率。以表 3 中 IEEE 118 和 300 节点系统为例进行分析, 交替迭代算法在计算这 2 个系统时分别节约燃料 23.5 t/h 和 37.0 t/h。以 560 元/t 的标准煤计算, 每天可节约燃料 564 t 和 888 t, 折合人民币 315 840 元和 497 280 元。需要补充的是, 传统 Benders 分解算法在计算子问题之前需要借助潮流来判断该故障是否越限^[14], 以此来提高计算速度。然而这种处理方式并未考虑控制变量的调节作用, 在系统总体故障数较多的情况下容易导致筛选的越限故障数偏多, 从而引起目标函数值的劣化和迭代次数增多。为保证收敛性, 本文采用的算法 D 通过直接计算子问题和弱化越限标准的方式减少了筛选故障数, 因此算法 D 的目标函数值较算法 E、F 稍低。

表 3 测试系统的燃料消耗

Table 3 Fuel consumptions of test systems

算法	燃料消耗/t		
	IEEE 118	IEEE 300	C703
A/B/C	2.4459×10^3	9.6785×10^3	*
D	2.4158×10^3	9.6274×10^3	—
E	2.4224×10^3	9.6415×10^3	4.4083×10^3
F	2.4224×10^3	9.6413×10^3	4.4082×10^3

图 3 是算法 C—F 相对算法 A 的计算效率图, 计算效率定义见式(23)。图中, 算法 B 和 C703 算例因内存溢出(32 位系统)而未能列出。事实上, 基于分块对角加边矩阵的分解协调算法相比集中式算法计算速度更慢, 即使是采用稀疏并行和因子表重用等技术。主要原因在于该算法每次迭代时需多次求逆或解方程, 该过程严重降低了其计算速度。图中算法 C 的效率为算法 A 的 1.6~1.9 倍, 这对于只在

解方程处用细粒度 Cholesky 分解代替传统串行 Cholesky 分解而程序其他模块均为串行的情况下, 已是很可观的。算法 D 在分解的子问题数即故障数较少时, 计算效率较高, 这一点从算例之间的对比可以得出。与上述方法相比, 本文所提 2 种算法的串行和并行效率分别在 5 倍和 11 倍以上。随着系统规模的扩大, 加速效果越明显。当测试系统为 IEEE 300 时, 算法 E 和 F 的并行计算效率分别高达 19 倍和 27 倍。由于内存溢出, 表 2 中未能给出算法 A 计算 C703 算例的时间。为此, 笔者在 64 位系统中对该算例进行了测试。测试结果显示: 算法 A 迭代 69 次, 总共耗时 53 286.8 s, 算法 E 和 F 的并行计算速度分别为算法 A 的 $53\,286.8/176.0=302.8$ 倍和 $53\,286.8/143.9=370.3$ 倍。

$$E_{B-F}=T_A/T_{B-F} \tag{23}$$

其中, E_{B-F} 分别为算法 B—F 相对 A 的计算效率; T_A 和 T_{B-F} 分别为算法 A 和算法 B—F 的串行或并行计算时间。

图 4 给出了各算法的加速比(同一算法的串行与并行计算时间之比)。图中, 按加速比由低到高排序依次为算法 C、E、F 和 D。上文已经提到, 算法 C

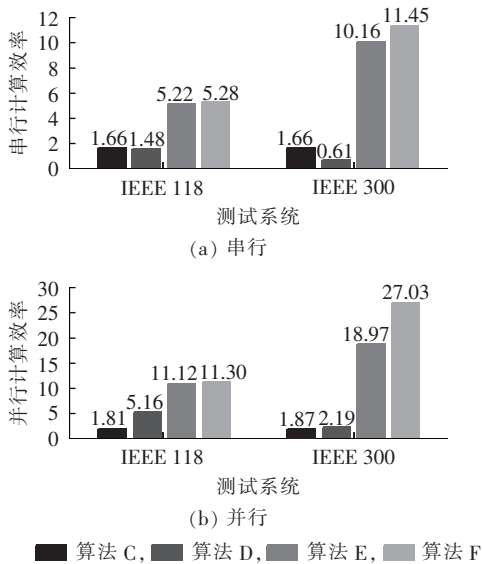


图 3 4 种算法的计算效率
Fig.3 Computational efficiencies of four algorithms

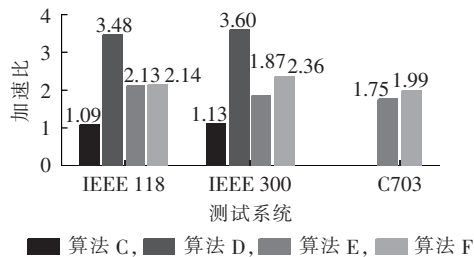


图 4 4 种算法的加速比
Fig.4 Speedup ratios of four algorithms

的并行处理部分仅在解方程处,属于细粒度解耦并行,因而加速比较低。算法 D 的加速比高于算法 E、F 的原因是其子问题的并行度更高。即算法 D 在迭代时,每个故障子问题均可参与并行计算。同样条件下,算法 E、F 有部分故障进入故障集 C_s 中(见图 1),而这部分是不能并行处理的,从而导致算法 E、F 的并行性能略低于算法 D。

表 4 列出了 6 种算法计算各系统的占用内存峰值。可见,算法 B 最高,算法 C 和 A 次之。算法 E 和 F 的内存使用量取决于不可控故障数,而不可控故障数与风险度指标直接相关。算法 D 分解的主问题和每个子问题的规模与常规 OPF 相当,因此在所有方法中算法 D 占用内存最低。

表 4 6 种算法占用内存比较
Table 4 Comparison of memory occupation among six algorithms

算法	占用内存 / MB		
	IEEE 118	IEEE 300	C703
A	479.59	883.51	内存不足
B	内存不足	内存不足	内存不足
C	481.20	913.70	内存不足
D	8.14	12.31	—
E	27.93	161.90	553.74
F	27.76	108.03	415.41

表 5 和表 6 分别是改进算法和传统严重度指标排序法(取越限程度最严重的前 3 个故障)计算

表 5 改进算法求解 IEEE 300 节点系统的迭代过程
Table 5 Iterative process of improved algorithm for IEEE 300-bus system

迭代次数	不可控故障集 C_E	C_s 中新增故障
1	20, 25, 43, 54, 71, 75, 78, 81, 84, 85, 120, 169, 170, 171, 178, 183, 187, 250, 376, 377, 378, 384	84, 85, 183, 187, 376, 377, 378, 384
2	25, 55, 71, 78, 120, 165, 170, 178, 191, 192, 194, 195	25, 55, 71, 78, 120, 165, 170, 178, 191, 192, 194, 195
3	无	无

表 6 传统严重度指标法求解 IEEE 300 节点系统的迭代过程

Table 6 Iterative process of traditional severity index method for IEEE 300-bus system

迭代次数	不可控故障集 C_E	C_s 中新增故障
1	18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 33, 43, 47, 54 等(共 53 个)	85, 376, 384
2	18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 33, 55, 71, 76 等(共 40 个)	183, 187, 378
3	18, 20, 21, 23, 24, 25, 33, 55, 71, 76, 78, 79 等(共 32 个)	192, 194, 195
9	23, 222, 271	23, 222, 271
10	3, 26, 79, 117	26, 79, 117
11	3	3
12	96	96
13	无	无

IEEE 300 节点系统的迭代过程。表中故障编号对应于标准数据文件的支路编号,且均为断线故障。其中传统方法迭代 13 次,用时 490.3 s。与本文所提算法相比,严重度指标法存在迭代次数多和计算时间长的缺点。究其原因,主要有 2 点:一是单一越限指标造成的严重程度靠前的故障不一定全是起主导作用的故障;其次,筛选的故障数对算法的收敛性影响至关重要。根据系统的不同,选取的个数并不具有统一的标准。而本文所提算法中约束潮流子问题式(8)的目标函数结合了电压(无功)和有功偏差 2 项指标,相比单一指标的严重度排序法,算法 E、F 更能准确反映系统的安全水平。

图 5 是交替迭代算法计算 IEEE 300 节点系统得到的燃料消耗量和不可控故障数随风险度取值的变化曲线,图 6 是对应的计算时间。如前所述,当风险度取值较小时,所得结果十分接近原始 PSCOPF 问题的解。随着风险度逐渐增大,不可控故障数呈递减趋势,原问题的计算效率和系统的经济性水平也随之相应提高。当风险度增加到 10^{-4} 时,系统的发电成本和计算时间已大幅降低,并且其下降趋势趋于平缓。考虑到系统的安全性,该取值已足够满足工程应用需求。如果继续增加风险度,原问题则最终蜕化为 CSCOPF 问题。由此可见,风险度指标不仅衡量着系统的安全性和经济性水平,更是起着连接 PSCOPF 和 CSCOPF 的桥梁作用。

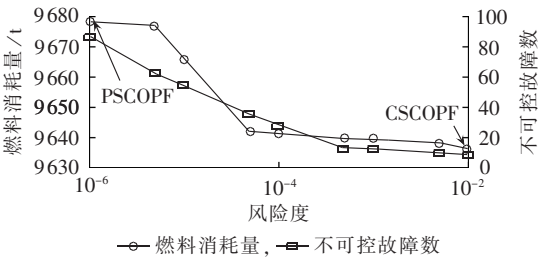


图 5 燃料消耗量与不可控故障数随风险度变化曲线
Fig.5 Fuel consumption curve and uncontrollable fault amount curve vs. risk degree

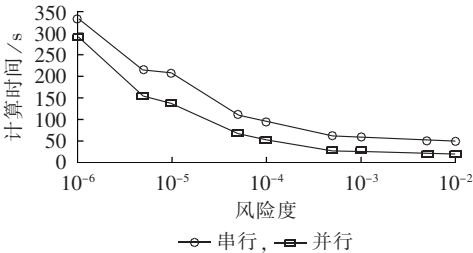


图 6 计算时间随风险度变化曲线
Fig.6 Curves of computing time vs. risk degree

4 结论

本文提出一种基于风险控制的交替迭代算法。该算法结合电力系统实际运行控制存在的基本事

实,通过引入一个由控制变量偏差构造的综合风险指标,将原始大规模 PSCOPF 问题分解为规模较小的 PSCOPF 和约束潮流 2 个子问题。子问题之间采取交替迭代的求解策略,用以滤除可控故障,从而达到缩减故障集规模的目的。算例测试结果表明,相较于传统的求解方法,所提算法结合了 PSCOPF 的安全性和 CSCOPF 的经济性,具有收敛速度快、计算效率高和运行经济性好的优点,对于 SCOPF 的研究和应用不失为一种有益的探索和补充。

参考文献:

- [1] CARPENTIER J. Contribution to economic dispatch problem[J]. Bull Soc France Elect,1962,3(8):431-447.
- [2] WEI H,SASAKI H,KUBOKAWA J,et al. Large scale hydro-thermal optimal power flow problems based on interior point nonlinear programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000,15(1):396-403.
- [3] GAN D,THOMAS R J,ZIMMERMAN R D. Stability-constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000,15(2):535-540.
- [4] 袁越,久保川淳司,佐佐木博司,等. 基于内点法的含暂态稳定约束的最优潮流计算[J]. 电力系统自动化,2002,26(13):14-19.
YUAN Yue,KUBOKAWA Junji,SASAKI Hiroshi,et al. Interior point method based optimal power flow with transient stability constraints[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(13):14-19.
- [5] 李逸驰,孙国强,杨义,等. 含经 VSC-HVDC 并网海上风电场的交直流系统概率最优潮流[J]. 电力自动化设备,2015,35(9):136-142.
LI Yichi,SUN Guoqiang,YANG Yi,et al. Probabilistic optimal power flow of AC/DC system with offshore wind farm connected to grid via VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015,35(9):136-142.
- [6] ALSAC O,STOTT B. Optimal load flow with steady-state security[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1974,pas-93(3):745-751.
- [7] MONTICELLI A,PEREIRA M V F,GRANVILLE. Security-constrained optimal power flow with post-contingency corrective rescheduling[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1987,2(1):175-180.
- [8] 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.
- [9] CAPITANESCU F,GLAVIC M,ERNST D,et al. Contingency filtering techniques for preventive security-constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,22(4):1690-1697.
- [10] BOUFFARD F,GALIANA F D,ARROYO J M. Umbrella contingencies in security-constrained optimal power flow[C]// 15th Power Systems Computation Conference. Liège,Belgium: IEEE,2005,1-7.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 李佩杰,韦化,李滨,等. 最优潮流中有向无环图的并行数值分解算法[J]. 电力系统自动化,2012,36(19):66-72.
LI Peijie,WEI Hua,LI Bin,et al. A parallel numerical factorization algorithm based on directed acyclic graph in optimal power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012,36(19):66-72.
- [14] LI Y,MCCALLEY J D. Decomposed SCOPF for improving efficiency[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2009,24(1):494-495.
- [15] 郑海艳,简金宝,全然,等. 基于改进的 Benders 分解与透视割平面的机组组合算法[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):133-138.
ZHENG Haiyan,JIAN Jinbao,QUAN Ran,et al. Unit commitment algorithm based on improved Benders decomposition and perspective cut[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015,35(1):133-138.
- [16] 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.
- [17] VACCARO A,CAIZARES C A,BHATTACHARYA K. A range arithmetic-based optimization model for power flow analysis under interval uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(2):1179-1186.
- [18] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2003:120-123.
- [19] 汪超群,韦化,吴思缘,等. 七种最优潮流分解协调算法的性能比较[J]. 电力系统自动化,2016,40(6):49-57.
WANG Chaoqun,WEI Hua,WU Siyuan,et al. Comparative analysis of seven decomposition and coordination algorithms for optimal power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016,40(6):49-57.

作者简介:



汪超群

汪超群(1990—),男,安徽安庆人,博士研究生,主要研究方向为电力系统最优运行与规划(E-mail:wangchaoqun2014@sina.com);

韦化(1954—),男,广西忻城人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为现代内点理论及其在电力系统中的应用,涉及最优潮流、电压稳定、状态估计等(E-mail:weihua@gxu.edu.cn);

吴思缘(1990—),女,广西桂林人,硕士,主要研究方向为电力系统最优运行与规划(E-mail:wusiyuan904@163.com)。

Improved PSCOPF model based on risk management and
alternative iteration algorithm

WANG Chaoqun,WEI Hua,WU Siyuan

(Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Technology,Guangxi University,Nanning 530004,China)

Abstract: The low computational efficiency and excessively-conservative results of PSCOPF(Preventive Security-Constrained Optimal Power Flow) restrict its application,aiming at which,an improved model with controllable risk and an alternative iteration algorithm are proposed. According to the practical operation of power system,deviations are introduced to the operating variables,such as active power of generator,voltage of reactive source,etc. The minimum square sum of deviations is taken as the comprehensive risk index to construct the complementary voltage constraints for decomposing the original large-scale PSCOPF problem into a PSCOPF problem with less faults and a constrained power-flow problem. Alternative iteration is carried out between two problems to obtain an uncontrollable fault set and a controllable fault set for solving the entire problem. The results of tests for standard IEEE 118-bus system,IEEE 300-bus system and an actual 703-bus 241-fault system show that,without system security debasement,the proposed model and algorithm has better economy and higher computation efficiency,and compared with the centralized computation of traditional model,its memory occupation is decreased by 80 percent,and its serial and parallel speedups are more than 5 and 10 times respectively.

Key words: preventive security constraint; optimal power flow; risk control; alternative iteration; constrained power flow; parallel computing; models

(上接第 113 页 continued from page 113)

SOC characteristics of power-supply failure of Guangzhou distribution network

ZHONG Qing¹,ZHANG Zhe¹,XU Zhong²,CUI Xiaofei²,LIU Feng¹,
WANG Gang¹,WANG Longjun¹

(1. School of Electric Power,South China University of Technology,Guangzhou 510641,China;
2. Electric Power Test & Research Institute,Guangzhou Electric Power Company,Guangzhou 510000,China)

Abstract: The SOC(Self-Organized Criticality) characteristics of distribution network power-supply failure can be researched based on the statistics of power-supply reliability,which may provide the theoretical basis for improving the operational level and power-supply reliability of distribution network. Based on the power-supply reliability data of Guangzhou 10 kV distribution network,the quantity of de-energized household and the duration of emergency outage are chosen as the statistical objects. The linear relationship between the scale and frequency of the chosen objects on log-log scale is fitted by the least squares method and validated by *F*-test,which preliminarily verifies the SOC characteristics of 10 kV distribution network power-supply failure. The operational significance of SOC characteristics to the operation of distribution network is given.

Key words: distribution network; self-organized criticality; power-law distribution; power-supply reliability; power-supply failure