

基于补偿法的预防性静态安全控制

阳育德,冯彦维,韦 化

(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:针对大规模复杂电力系统进行预防性静态安全控制计算过程中,占用内存大、求解效率低的问题,提出一种基于补偿法的快速优化求解方法。通过分析该问题的优化机制,建立等效的求解模型,运用补偿法进行预想事故状态的快速分析计算,最后采用内点法求解问题模型,从而获得满足 $N-1$ 安全准则的合理运行方式,防止 $N-1$ 事故发生后系统越限故障的发生。在 IEEE 30、118、300 节点系统以及 S-1047 仿真系统进行的测试表明,所提方法提高了大规模预防性静态安全控制的计算效率,可以快速准确地获得满足系统安全稳定运行要求的调整结果。

关键词: 电力系统; 预防性静态安全控制; 预想事故; $N-1$; 补偿法; 内点法; 安全; 控制

中图分类号: TM 734

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.12.007

0 引言

电力系统静态安全控制是保证电力系统安全稳定运行的重要措施,控制策略可以为电力系统规划和制定运行方式提供指导。其属于安全约束最优潮流^[1]SCOPF(Security Constrained Optimal Power Flow)问题的研究范畴,目的是通过对控制变量的优化调整,使得电力系统在基态(正常运行状态,下同)以及事故状态下,满足系统对安全性的要求。SCOPF 问题一般是一个同时包含连续和离散变量的非线性、非凸、大规模的优化问题,具体可以分为以下 2 种类型:(1)预防控制的安全约束最优潮流 PSCOPF(Preventive Security Constrained Optimal Power Flow)^[1],不考虑预想事故状态下系统的发电再调整,仅通过调整基态的系统控制变量(如发电机有功出力、发电机机端电压等),使得在该控制变量下发生事故后系统不发生越限故障;(2)校正控制的安全约束最优潮流 CSCOPF(Corrective Security Constrained Optimal Power Flow)^[2],基态及预想事故状态下采用不同的控制决策,通过进行事故发生后的发电再调整消除系统的越限情况。

现代电力系统的发展给 SCOPF 问题的求解带来了新的挑战。日益扩大的电力系统规模以及预想事故,使得 SCOPF 问题的求解规模越来越大,直接导致求解速度下降,计算结果对电力系统运行指导的时效性大幅降低,甚至由于计算机内存空间的限制而无法进行计算^[3]。针对这些问题,学者们主要在 2 个方面进行了相关的研究探索。在模型求解之外,

文献[4]提出采用网络压缩方法,把预想事故系统等值为与故障关联度较高的局部网络,从而压缩预想事故的系统规模,但事故的网络等值计算工作量较大;文献[5]提出采用事故过滤技术,在预想事故集中筛选出起主导作用的事故,减少加入到优化模型中的预想事故数量,需要循环执行多次 SCOPF 计算,执行效率不高。在模型的优化求解部分,文献[6-7]提出采用奔德斯分解法,把 SCOPF 问题分解为一个基态主问题以及各个预想事故相关的子问题,对主从问题进行协调分解计算,有效控制了求解规模,但其理论上要求所求问题在可行域内为凸,而 SCOPF 问题一般情况下不满足该条件;文献[8]提出基于连续线性规划技术的方法,将该优化问题分解为非线性潮流和线性控制灵敏度计算子问题以及基于灵敏度的线性规划控制子问题,需要进行大量的灵敏度计算,求解过程较复杂;文献[9]在采用直流安全约束最优潮流(DC SCOPF)求解交流安全约束最优潮流(AC SCOPF)问题,提高了计算速度,但计算误差大,并且无法考虑电压的安全约束。

在电力系统中广泛使用的 PSD-BPA、PSSSA 等分析计算软件,都采用补偿法进行 $N-1$ 快速轮断计算,计算结果得到工程技术人员的认可,并应用在电力系统的规划以及运行分析当中。针对 SCOPF 当中的静态 PSCOPF 问题,本文把补偿法运用到问题的优化求解过程中,通过建立等效模型,在优化过程中采用补偿法进行事故状态的快速计算,将其加入到安全约束当中,对不满足电力系统 $N-1$ 安全准则的预想事故进行优化控制计算。所提方法避免了对事故状态的潮流求解,极大地缩小了问题的规模,在满足静态安全控制要求的基础上,大幅地缩短了计算时间,提高了求解效率,从而快速得到指导全网发电机组出力调整的最优控制策略。

收稿日期:2015-01-23;修回日期:2015-09-18

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013-CB228205);广西理工科实验中心重点项目(LGZX201209)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB228205) and Key Project of Guangxi Institute of Science Experiment(LGZX201209)

1 问题的数学模型

传统的 PSCOPF 问题模型,通过将基态和事故状态的潮流方程以及安全约束方程联立进行优化求解^[10-11]。优化模型如式(1)所示:

$$\begin{aligned} \min & f(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \\ h_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_0) &= 0 \\ \underline{\mathbf{u}} \leq \mathbf{u}_0 \leq \bar{\mathbf{u}} \\ \underline{\mathbf{x}} \leq \mathbf{x}_k \leq \bar{\mathbf{x}} \\ k &= 0, 1, \dots, N_c \end{aligned} \quad (1)$$

其中,目标函数 $f(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ 可以是发电机有功出力变化量最小、发电费用最小、系统有功损耗最小等电力系统运行当中关心的参数; $k=0, 1, \dots, N_c$ 组成该计算模型所考虑的预想事故集,下标 $k=0$ 表示基态参数, $k=1, 2, \dots, N_c$ 表示预想事故状态的参数;等式约束 $h_k(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_0)$ 表示系统的潮流方程,不等式约束包含系统控制变量 $\mathbf{u}_0$ 以及状态变量 $\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_0$ 表示自变量,用于调整系统状态,事故前后保持不变, $\mathbf{x}_k$ 表示因变量,表示当前自变量 $\mathbf{u}_0$ 下的系统状态, $\underline{\mathbf{u}}, \bar{\mathbf{u}}, \underline{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{x}}$ 分别为它们的上、下限约束。可以看到,当系统预想事故集包含 N_c 个预想事故时,模型中将包括 N_c+1 组等式方程以及 N_c+1 组不等式方程,模型大小主要由预想事故数量决定。因此,问题的求解时间将随着系统规模以及预想事故数量的增加而急剧上升,甚至由于超出计算机的可用内存而无法计算。

通过对 PSCOPF 问题的进一步分析可知,基态的作用是进行潮流调整,以满足当前系统的运行要求;预想事故状态的作用是校验事故发生后系统安全约束越限的情况^[10]。由于控制变量在事故前后保持不变,事故后需要校验的只有状态变量,如果事故发生后的系统状态可以通过基态的系统参数直接求解得到,则预想事故后的系统潮流方程无需加入到求解模型当中。因此,上述 PSCOPF 问题可以转化为如下的等效模型^[12-13]:

$$\begin{aligned} \min & f(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \\ h_0(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) &= 0 \\ \underline{\mathbf{u}} \leq \mathbf{u}_0 \leq \bar{\mathbf{u}} \\ \underline{\mathbf{x}} \leq \mathbf{x}_0 \leq \bar{\mathbf{x}} \\ \underline{\mathbf{x}} \leq \mathbf{x}_k(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \leq \bar{\mathbf{x}} \\ k &= 0, 1, \dots, N_c \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2)可以看到,略去预想事故后的系统潮流方程之后,状态变量由基态参数通过函数表达式 $\mathbf{x}_k(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ 表示,模型的等式部分只包含了基态潮流方程。预想事故集的变化只影响模型的不等式部分,同时考虑 N_c 个预想事故时,相比于传统的联立模型

(1),减少了 N_c 组等式方程。并且可以注意到,在等效模型当中若不考虑预想事故的安全约束,模型本身就是一个传统的最优潮流 OPF (Optimal Power Flow) 问题。通过模型的等效转化,把复杂的 PSCOPF 问题转化成为了近似 OPF 模型,缩小了求解模型规模的同时,结构也得到了优化。求解式(2)等效模型的关键在于如何求得事故后系统的状态表达式 $\mathbf{x}_k(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ 。

2 预想事故状态计算

求解事故发生后系统的状态实际上是一个静态安全分析 SSSA (Steady-State Security Analysis) 的过程。为了提高 SSSA 的效率,一般采用快速分析方法,比如直流潮流法、灵敏度分析法以及补偿法^[14]。直流潮流法通过把非线性电力系统潮流问题简化为线性电路问题,从而使分析计算方便快捷,但是精度差,并且只能校验过负荷,不能校验电压越界的情况;灵敏度分析法将线路开断视为正常运行情况的一种扰动,以节点注入功率的增量模拟断线的影响,计算精度较高,但计算过程复杂,计算节点注入功率增量的计算量较大^[15];补偿法是指,当网络中支路开断的情况下,可以认为该支路未被开断,而在其两端节点处引入某一待求的电流增量或功率增量(或称补偿电流或补偿功率)来模拟支路的开断^[16],是一种方便快捷地取得系统拓扑关系发生变化下系统电压的方法。

其中,补偿法求解快速,计算结构简单,故障判断准确,求解效率明显高于直流潮流法以及灵敏度分析法,有利于提高优化计算的效率。并且通过电压这一电力系统关键状态参数可以方便地求取系统的其他状态变量。因此,本方法采用补偿法求取事故下的系统状态变量的表达式 $\mathbf{x}_k(\mathbf{x}_0)$ 。

假设系统发生断线事故 k , 采用补偿法对节点 m, n 之间的线路进行开断计算。可以视为在 m, n 之间并联一条与开断线路等值的负阻抗支路,即 $Z'_{mn} = -Z_{mn}$ 。假设增加并联支路后网络的节点注入电流不变,可通过向节点 m, n 分别注入补偿电流 I_{mn}^k 和 $-I_{mn}^k$ 的方法,在不改变原网络结构的情况下来模拟线路

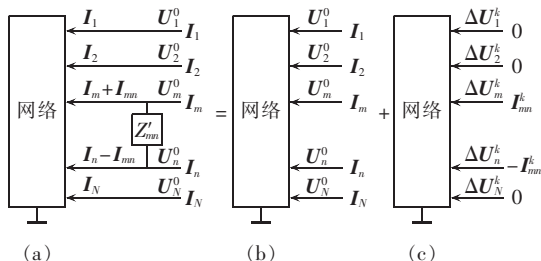


图 1 补偿法原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of compensation method

的开断。根据叠加原理,把图 1(a)所示线路开断后的网络等效地拆分为图 1(b)、(c) 2 个网络^[15,17]。

图 1(a)表示追加并联负阻抗为 Z'_{mn} 的支路模拟线路断开后的网络;图 1(b)表示追加并联负阻抗前的网络;图 1(c)表示注入补偿电流 I^k_{mn} 后的网络。 N 表示网络节点数。因此,线路开断后的电压 U^k 可表示为:

$$U^k = U^0 + \Delta U^k \quad (3)$$

其中, U^0 表示网络改变前的系统电压; ΔU^k 表示网络改变后系统电压的变化量,其根据图 1(c) 网络通过向节点 m, n 注入补偿电流 I^k_{mn} 和 $-I^k_{mn}$ 求得; U^0 表示系统正常潮流的节点电压,根据基态可求出。向网络中注入的电流向量可表示为:

$$T = I^k_{mn} M \quad (4)$$

其中, $M = [0, \dots, \overset{m}{1}, 0, \dots, \overset{n}{-1}, 0, \dots]^T$ 表示节点 m 注入电流、节点 n 输出电流。当开断线路为非标准变比变压器时, $M = [0, \dots, \overset{m}{n_T}, 0, \dots, \overset{n}{-1}, 0, \dots]^T$, 其中 n_T 为非标准变比,在节点 n 侧。因此电压改变量 ΔU^k 可表示为:

$$\Delta U^k = Y^{-1} T = Y^{-1} I^k_{mn} M \quad (5)$$

其中, Y 表示该网络的导纳矩阵;待求补偿电流 I^k_{mn} 通过等值发电机原理求得(在此不详细介绍),其表示如式(6)所示。

$$I^k_{mn} = -(M^T Y^{-1} M - Z_{mn})^{-1} M^T U^0 \quad (6)$$

如果把整个系统看成追加阻抗为 Z'_{mn} 的支路的等值电源,式(6)中 $M^T Y^{-1} M - Z_{mn}$ 的物理意义是追加的并联支路回路的等效阻抗, $M^T U^0$ 表示这个等值电源的空载电动势。结合式(3)和式(5)可得到线路开断后的节点电压:

$$U^k = [E - Y^{-1} M (M^T Y^{-1} M - Z_{mn})^{-1} M^T] U^0 = L^k U^0 \quad (7)$$

其中, E 表示 $N \times N$ 阶的单位对角矩阵; Z_{mn} 表示节点 m, n 之间的线路阻抗; $L^k = E - Y^{-1} M (M^T Y^{-1} M - Z_{mn})^{-1} M^T$ 表示网络发生断线事故 k 的电压关联矩阵。

上述式(7)通过矩阵形式表示为:

$$\begin{bmatrix} U_1^k \\ \vdots \\ U_m^k \\ \vdots \\ U_n^k \\ \vdots \\ U_N^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & I_{1m}^k & I_{1n}^k & \\ & 1 & \vdots & \\ & 1 + I_{mm}^k & I_{mn}^k & \\ & \vdots & 1 & \vdots \\ & I_{nm}^k & 1 + I_{nn}^k & \\ & \vdots & \vdots & 1 \\ I_{Nm}^k & I_{Nn}^k & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^0 \\ \vdots \\ U_m^0 \\ \vdots \\ U_n^0 \\ \vdots \\ U_N^0 \end{bmatrix} = L^k U^0 \quad (8)$$

其中, I 表示除对角线外矩阵的非零值。

由式(8)可以看到, L^k 是一个结构简单并且稀疏的线性矩阵表达式,只有对角线以及与开断线路两端节点 m, n 有关的列为非零值,其余位置的值全为

零。 L^k 的表达式完全由系统的网络拓扑参数构成,不包含任何的状态变量。每一个预想事故对应的 L^k 只需要计算一次就能满足优化控制计算过程中对事故电压的计算要求。

PSCOPF 问题主要考察系统发生事故后有功潮流转移所引起的线路传输功率越限故障。根据采用补偿法所求电压,预想事故状态下线路的有功功率表达式如下:

$$P_{ij}^k = U_i^k Y_{ij} [U_i^k \cos(-\alpha_{ij}) - U_j^k \cos(\delta_i^k - \delta_j^k - \alpha_{ij})] \quad (9)$$

其中, P_{ij}^k 表示预想事故后连接节点 i, j 的线路有功功率; Y_{ij} 与 α_{ij} 分别表示连接节点 i, j 的线路导纳的幅值和幅角; U_i^k, U_j^k 与 δ_i^k, δ_j^k 分别表示预想事故后节点 i, j 的电压幅值与幅角,可根据式(8)求得。

3 误差影响及控制

补偿法在计算过程中做了一个重要的假设:事故发生后除断线事故两端节点外的节点注入电流或者注入功率不变。而实际上在断线事故发生后所有的节点注入电流或者功率都会发生变化。并且叠加法应用的前提是线性方程,上述补偿法将其应用在非线性的电力系统潮流问题中,都不可避免地引入计算误差。由于优化过程中 PV 节点的电压幅值作为控制变量在事故前后保持不变,为避免由于误差造成 PV 节点电压的偏移,所求 PV 节点电压幅值直接采用事故前的电压值。

在等效求解模型中,事故后系统状态的作用是对基态的控制变量进行约束,而基态经过完全潮流方程的校验。因此优化计算的结果完全满足基态运行要求,误差的存在仅会对越限故障的控制结果造成影响。而其中的负误差(补偿法计算结果小于实际值)会造成对实际事故状态变量约束的不足,使得经过优化调整后的系统进行 $N-1$ 校验时仍会有线路功率轻微的越限。为保证对越限故障的有效控制,可以对约束进行“紧缩”处理。本文主要考虑事故后系统线路功率越限故障以及对其的控制,在此仅对事故线路约束的误差处理进行介绍。加入误差因子 ε 后,事故后线路有功功率约束表示为:

$$P_{ij}(1-\varepsilon) \leq P_{ij} \leq \bar{P}_{ij}(1-\varepsilon) \quad (10)$$

其中, P_{ij} 表示线路传输的有功功率; $\bar{P}_{ij}, \underline{P}_{ij}$ 分别表示线路功率有功功率上、下限。误差因子表示补偿法计算值与实际功率值的相对误差百分数。 ε 取值越大,对约束收缩得越紧,可以获得更可靠的控制结果,但随着可行域的减小,该优化问题的目标函数值同时会受到影响。在实际应用中可以根据补偿法在系统计算中的误差设置合适的 ε 值,在保证控制结果有

效性的基础上,获得理想的优化控制结果。

4 具体模型及求解

基于补偿法考虑多预想事故的 PSCOPF 问题具体求解模型如下。控制变量包括:发电机有功出力、发电机机端电压;考虑的系统故障为线路有功功率超限^[18-20]。上标 0 表示基态变量,上标 k 表示预想事故状态变量。

a. 目标函数:

$$\min \sum_{i \in S_G} (P_{Gi}^0 - P_{Gi}^k)^2 \quad (11)$$

其中, P_{Gi}^0 、 P_{Gi}^k 分别表示第 i 台发电机当前有功出力及初始有功出力; S_G 表示发电机集合。该式采用发电机改变量最小作为目标函数,以尽可能减小对发电机出力的调整。

b. 等式约束:

$$\begin{cases} P_{Gi}^0 - P_{Di}^0 - U_i^0 Y_{ij} \sum_{j=1}^N U_j^0 \cos(\delta_i^0 - \delta_j^0 - \alpha_{ij}) = 0 \\ Q_{Ri}^0 - Q_{Di}^0 - U_i^0 Y_{ij} \sum_{j=1}^N U_j^0 \sin(\delta_i^0 - \delta_j^0 - \alpha_{ij}) = 0 \end{cases} \quad i, j \in S_N \quad (12)$$

其中, P_{Di}^0 、 Q_{Di}^0 分别表示节点的有功和无功负荷; Q_{Ri}^0 表示节点 i 的无功源无功出力; Y_{ij} 、 α_{ij} 分别表示节点 i 、 j 之间线路导纳的幅值和幅角; U_i^0 、 δ_i^0 分别表示节点 i 的电压幅值和幅角; N 表示系统节点数; S_N 表示所有节点集合。式(12)是系统基态的潮流方程。

c. 不等式约束:

$$\begin{cases} \underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi}^0 \leq \bar{P}_{Gi} & i \in S_G \\ \underline{Q}_{Ri} \leq Q_{Ri}^0 \leq \bar{Q}_{Ri} & i \in S_R \\ \underline{U}_i \leq U_i^0 \leq \bar{U}_i & i \in S_N \end{cases} \quad (13)$$

$$\underline{P}_{ij} \leq P_{ij}^0 \leq \bar{P}_{ij} \quad (i, j) \in S_L^0$$

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

$$\begin{cases} \underline{P}_{ij}(1-\varepsilon) \leq P_{ij}^k \leq \bar{P}_{ij}(1-\varepsilon) & (i, j) \in S_L^k \\ k \in S_k \end{cases} \quad (14)$$

其中,上、下划线分别表示变量或约束的上、下限; S_R 表示无功源节点集合; S_L^0 、 S_L^k 表示线路集合; S_k 表示预想事故集合。式(13)描述了基态发电机有功出力、无功电源出力、电压及线路功率约束。式(14)描述了事故状态电压及线路功率约束(虽然事故电压不作为故障进行优化计算,作为电力系统的重要运行指标,依然加入到了安全约束当中),其可根据补偿法由式(8)、(9)求得。

由于模型不涉及离散变量,本文所求解的问题是一个连续非线性规划问题。现代内点法由于其收敛速度快、鲁棒性强、可以方便地处理各类约束,特别适合求解如 PSCOPF 一类的大型电力系统问题,在电力系统优化领域得到了广泛的应用,因而采用

内点算法进行求解该模型^[21-24]。

5 算例测试

采用 MATLAB2013(a)编程实现所提方法。运行环境为普通台式计算机,Intel Core i3 四核处理器,主频 3.2 GHz,2 GB 内存,32 位操作系统。对 IEEE 30、IEEE 118、IEEE 300 节点标准系统以及某 S-1047 节点仿真系统进行对比测试,验证本文所提方法的有效性以及快速性。

5.1 有效性测试

采用 IEEE 30 以及 IEEE 118 节点系统对本文所提方法的有效性进行测试。SSSA 采用补偿法进行系统 $N-1$ 线路开断计算,考虑系统发生输电线路 $N-1$ 断线事故后的线路有功功率超限故障。预想事故由断线线路序号表示,括号内表示线路连接的两端节点号。

5.1.1 IEEE 30 节点测试系统

该系统有 30 个节点、41 条线路、6 台发电机,总有功负荷 283 MW。系统结构如图 2 所示。根据该系统的补偿法误差分析,误差因子取 $\varepsilon=1.5\%$,电压限制取 0.9~1.1 p.u.。对该系统进行线路 $N-1$ 静态安全分析,筛选出事故集为线路 1(1-2)、2(1-3)、4(3-4)、5(2-5)、6(2-6)、9(6-7)。

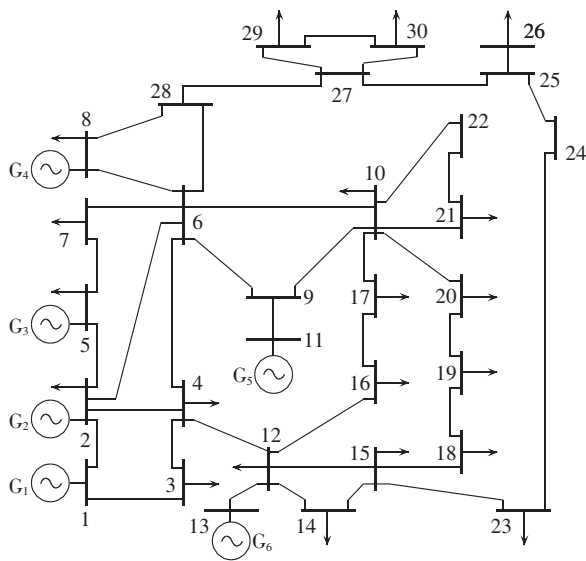


图 2 IEEE 30 节点系统

Fig.2 IEEE 30-bus system

把事故集中的所有事故作为预想事故集加入到基于补偿法的等效模型当中同时进行优化控制计算。系统的各发电机有功出力及机端电压的调整结果如表 1 所示,表中机端电压为标么值,后同。

由表 1 可知,优化后系统发电机总有功改变量为 75 MW,系统总有功出力由优化前的 292 MW 调整为 289 MW,基本保持不变。因为 PSCOPF 问题的本质是根据系统的安全性要求,重新调整系统的潮

表 1 IEEE 30 节点系统发电机优化结果
Table 1 Results of generator optimization for IEEE 30-bus system

发电机	有功出力/MW		机端电压	
	优化前	优化后	优化前	优化后
G ₁	139	111	1.060	0.9855
G ₂	58	54	1.045	0.9971
G ₃	25	41	1.010	0.9837
G ₄	35	48	1.010	0.9729
G ₅	18	25	1.082	0.9126
G ₆	17	10	1.071	0.9651

流分布,从而预防事故发生后越限故障的发生,潮流分布的变化对系统有功损耗的影响造成了优化前后总有功出力的细微差别。调整发电机有功出力以及机端电压后的得到系统新的基态,在此基础上再次进行 SSSA 计算,校验故障线路的功率。校验结果如表 2 所示。

表 2 IEEE 30 节点系统线路功率控制结果
Table 2 Results of branch active-power control for IEEE 30-bus system

开断线路	越限故障线路	有功出力/MW		功率限制/MW
		优化前	优化后	
1(1-2)	2(1-3)	146	115	120
	4(3-4)	136	106	120
	7(4-7)	85	59	60
2(1-3)	1(1-2)	141	114	120
4(3-4)	1(1-2)	139	111	120
5(2-5)	6(2-6)	66	52	60
	7(4-7)	72	50	60
	9(6-7)	93	76	80
6(2-6)	7(4-6)	67	46	60
9(6-7)	5(2-5)	95	79	80

由表 2 可知,进行控制计算后,越限故障线路功率都得到了有效的控制。由于引入了误差因子,所以优化后的值并没有完全到达约束上限,但部分已经接近限制值。优化过程中起主导约束作用的是线路 1、2 和 5、9 开断事故,部分线路功率都接近了约束的上限。在该系统中,线路 1、2 作为发电机 G₁ 的 2 个电能输出通道,当 G₁ 出力过大会造成其中一条线路断开后另一条线路功率越限。因此,发电机 G₁ 的有功出力应该保持在出线的功率限制以下,以保证系统 N-1 安全性。同时,节点 5 和节点 7 接有重负荷,由发电机 G₃ 以及线路 5 和线路 9 为其供电,线路 5、9 中任意一条线路退出运行都会造成另外一条线路功率增加,并导致线路功率越限。在保证负荷供电不受影响的情况下,应通过增加发电机 G₃ 的出力,提高该区域内部的电能供给能力,减少线路 5 和线路 9 上的传输功率,从而消除事故后的功率越限故障。

从表 1 中可以看到,优化后的发电机 G₁ 出力为 111 MW,降到了线路功率限值以下。发电机 G₃ 有功

出力由优化前的 25 MW 提高到了 41 MW,线路 5、9 一同承担的功率为 92 MW 减少到 76 MW,从而使得其中任一线路发生断线事故后另一线路都不会超出功率约束 80 MW 的限制,其余发电机则做出相应的出力调整,以满足系统的功率平衡,这与通过实际分析的调整结果是一致的。

为说明控制结果的现实有效性,参照表 1 的发电机出力及机端电压结果调整系统的基态,采用潮流法 SSSA 对其进行 N-1 验证,表 3 表示 ε 取值不同时

表 3 IEEE 30 节点系统潮流法静态安全分析校验结果
Table 3 Verification results of static security analysis based on power flow for IEEE 30-bus system

开断线路	越限故障线路	优化后有功出力/MW		功率限制/MW
		$\varepsilon=0$	$\varepsilon=1.5\%$	
1(1-2)	7(4-7)	61	60	60
5(2-5)	9(6-7)	81	80	80

表 3 列出了没有加入误差因子($\varepsilon=0$)时,采用所提方法进行优化后仍存在线路功率越限的 2 个开断事故。可以看到,即使不进行误差控制($\varepsilon=0$),大部分原有故障都已得到了有效的控制,整个系统的 N-1 越限故障只有线路 1、5 开断造成的线路 7、9 功率轻微越限,取得了很好的控制效果。本例采用 $\varepsilon=1.5\%$,优化控制的结果则完全通过了 N-1 线路开断计算的校验,所有越限故障都得到了消除,使得计算结果更具有效性。

5.1.2 IEEE 118 节点测试系统

采用规模更大的 IEEE 118 节点系统对所提方法有效性进行进一步的验证。误差因子 ε 取 3%,电压限制取 0.9~1.1 p.u.。该系统包含 118 个节点,186 条线路,16 台发电机,总有功负荷 4227 MW。通过补偿法 SSSA 计算得到预想事故集为线路 15、29、30、34、35、50、87、88、113、115、123、124、126、146。

采用本文所提出的方法对由开断事故线路集合中的 14 条线路组成的预想事故集进行优化控制计算。发电机有功出力以及机端电压的优化结果如表 4 所示。

本文方法基于补偿法进行优化控制,所以其结果完全满足补偿法 SSSA,表 2 中已经进行了验证,该系统的补偿法校验结果在此不再列出。采用基于潮流法的 SSSA 对优化结果进行验证,结果如表 5 所示。

由表 5 可知, $\varepsilon=0$ 时的优化结果会使得线路 124 开断造成的线路 126 功率轻微越限,其余线路越限均得到了有效控制。本算例采用 $\varepsilon=3\%$ 时,则所有线路功率越限故障全部都控制在限制内。

通过 IEEE 30 以及 IEEE 118 节点系统的测试,表明本文所提方法能够对复杂大系统进行多预想事

表 4 IEEE 118 节点系统发电机优化结果

Table 4 Results of generator optimization for IEEE 118-bus system

发电机	有功出力/MW		机端电压	
	优化前	优化后	优化前	优化后
G ₁	450	420	1.050	1.036
G ₂	85	200	0.990	1.015
G ₃	220	191	1.050	0.995
G ₄	314	291	1.015	0.966
G ₅	204	331	1.025	0.956
G ₆	48	118	0.955	0.932
G ₇	155	167	0.985	0.966
G ₈	160	145	0.995	0.971
G ₉	391	359	1.005	0.981
G ₁₀	392	335	1.050	0.994
G ₁₁	516	520	1.035	0.988
G ₁₂	477	467	1.040	0.925
G ₁₃	607	423	1.005	0.960
G ₁₄	252	267	1.017	0.957
G ₁₅	40	56	1.001	0.952
G ₁₆	36	52	0.980	0.954

表 5 IEEE 118 系统潮流法静态安全分析校验结果

Table 5 Verification results of static security analysis based on power flow for IEEE 118-bus system

开断线路	越限故障 线路	优化后有功出力/MW		功率 限制/MW
		$\varepsilon=0$	$\varepsilon=3\%$	
124	126	306	298	300

故的有效优化控制。并且通过设置合适的误差因子可以使得优化结果完全满足系统的预防性控制要求,采用潮流计算进行验证,表明结果具有现实应用意义。在实际计算中发现,补偿法的线路功率计算误差一般不超过 3%, ε 取 0~3% 可满足控制的要求,并且其与系统规模的大小并无关系,完全可以适应大规模系统的计算。

5.2 快速性测试

在第 1 节等效模型的介绍当中提到等效模型在理论上具有比传统联立求解模型更快的计算速度以及更好收敛特性。下面对其进行相关的验证测试。测试所指传统方法是指采用联立事故前后潮流方程求解 PSCOPF 问题的方法,同样采用 MATLAB 进行编程实现。

首先研究模型规模与预想事故数量的关系。由于求解模型规模的大小直接影响计算时间,为更加客观地进行比较,排除收敛过程不同所造成的干扰,在此用求解过程中单次迭代计算所用的时间表征模型规模大小。在 IEEE 118 以及 IEEE 300 节点系统上进行对比测试,做出单次迭代计算时间与预想事故数量关系图,如图 3 所示。

图 3 中,时间曲线斜率越大说明模型规模受预想事故数量影响越大。随着预想事故数量的增加,实线和点划线呈超线性增加的趋势,增长十分迅速,IEEE 118 节点系统以及 IEEE 300 节点系统考虑 50

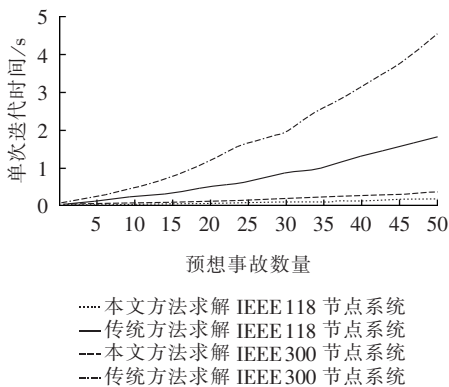


图 3 单次迭代时间与预想事故数量关系

Fig.3 Relationship between single iteration time and postulated contingency number

个预想事故的求解时间比考虑单个预想事故时分别增加了 70 倍以及 90 倍,并且系统的规模越大计算时间的增长速度越快。而虚线和点线呈近似线性的缓慢上升,考虑 50 个预想事故,2 个测试系统的单次迭代时间都仅增长了 13 倍,远低于联立求解方法。本文所提方法表现出对预想事故数量的低灵敏度特性。

选取 IEEE 30、118、300 节点系统以及 S-1 047 节点仿真系统对不同预想事故数量的迭代求解过程进行综合测试比较。测试结果如表 6 所示。

表 6 计算时间对比

Table 8 Comparison of computation time

测试系统	预想事故 数量	迭代次数		计算时间/s	
		传统方法	本文方法	传统方法	本文方法
IEEE 30	3	15	15	0.25	0.15
	6	30	19	0.84	0.28
IEEE 118	4	20	15	2.01	0.43
	14	23	22	5.04	1.66
	28	24	24	16.63	3.55
IEEE 300	5	35	25	5.71	1.62
	10	37	32	14.90	2.75
	17	39	32	35.41	5.78
	34	39	35	118.77	11.25
	3	49	35	21.25	10.48
S-1 047	5	67	52	48.69	21.61
	14	71	57	183.81	30.60

由表 6 可以看到,所提方法在收敛性上要普遍好于传统联立求解方法,求解时间具有明显优势。随着预想事故数量的增加,这种优势越来越明显。进一步分析可以发现,预想事故数量的增加,传统方法耗时增量主要来自于矩阵规模的扩大所增加的矩阵运算时间;本文所提方法所耗时间增量的其中一部分来自处理各个预想事故的变量计算上,如 S-1 047 测试系统中,预想事故由 5 个增到 14 个时,求解时间增加 9 s,其中有 3.2 s 来自于增加的预想事故状态计算。而预想事故状态的计算是相互独立的,满足并行计算的要求,采用并行计算技术同时进行多个预

想事故参数的计算可以进一步提高计算速度。

6 结语

本文提出预防性静态安全控制的快速计算方法,通过建立等效的求解模型,缩小了问题模型的规模,优化了模型结构;优化过程中采用补偿法进行预想事故参数计算,对预想事故状态安全约束的越限情况进行快速校验;最后运用内点法对模型进行求解,实现对多预想事故的 PSCOPF 问题的快速优化计算。在多个测试系统进行对比测试及分析,验证了所提方法的有效性,并且在达到优化控制效果的前提下,比传统方法具有更好的收敛特性及模型对预想事故数量的低灵敏度特性,占用内存少,计算速度快。配合基于补偿法的 SSSA 结果,可以快速完成对电力系统静态安全稳定的分析与优化控制计算,对于考虑多预想事故的大规模复杂电力系统,可以指导全网发电机进行预调整从而有效地预防电力系统潜在故障的发生,提高电力系统的静态安全性与可靠性。

参考文献:

- [1] ALSAC O, STOTT B. Optimal load flow with steady-state security [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1974, PAS-93(3):745-751.
- [2] MONTICELLI A, PEREIRA M V F, GRANVILLE S. Security-constrained optimal power flow with post-contingency corrective rescheduling [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1987, 2(1):175-180.
- [3] CAPITANESCU F, RAMOS M, PANCIATICI P, et al. State-of-the-art, challenges, and future trends in security constrained optimal power flow [J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81:1731-1741.
- [4] PLATBROOD L, CAPITANESCU F, MERCKX C, et al. A generic approach for solving nonlinear-discrete security-constrained optimal power flow problems in large-scale systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3):1194-1203.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 默哈莫德·夏班, 刘皓明, 李卫星, 等. 静态安全约束下基于 Benders 分解算法的可用传输容量计算 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8):8-12.
MOHAMMED Shaaban, LIU Haoming, LI Weixing, et al. ATC calculation with static security constrained using benders decomposition [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8):8-12.
- [8] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 一种基于连续线性规划技术的在线静态安全校正算法 [J]. 电网技术, 2005, 29(5):25-30.
ZHAO Jinqun, JIANG Xiaodong, ZHANG Boming. A successive linear programming based on-line static security corrective control approach [J]. Power System Technology, 2005, 29(5):25-30.
- [9] MARANO-MARCOLINI A, CAPITANESCU F, MARTINEZ-RAMOS J L, et al. Exploiting the use of DC SCOPF approximation to improve iterative AC SCOPF algorithms [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3):1459-1466.
- [10] 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.
- [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] ZHANG Mingye, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. A sensitivity based simplified model for security constrained optimal power flow [C]//2012 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia). Tianjin, China: [s.n.], 2012:1-4.
- [13] 傅旭, 王锡凡, 张钦, 等. 电力系统静态安全分析中的校正控制算法 [J]. 中国电力, 2007, 40(11):33-37.
FU Xu, WANG Xifan, ZHANG Qin, et al. New approach of corrective control for static security analysis in power systems [J]. Electric Power, 2007, 40(11):33-37.
- [14] 丁平, 李亚楼, 徐得超, 等. 电力系统快速静态安全分析的改进算法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(31):77-82.
DING Ping, LI Yalou, XU Dechao, et al. Improved algorithm of static state security analysis of power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31):77-82.
- [15] 王锡凡. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [16] 吴舜际. 电力系统静态安全分析 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985.
- [17] 杜正旺, 哈恒旭, 宋扬, 等. 基于灵敏度-补偿法的电力网络开断潮流新算法 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16):103-107.
DU Zhengwang, HA Hengxu, SONG Yang, et al. New algorithm based on the sensitivity and the compensation methods for line-outage problem of power network [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16):103-107.
- [18] 李响, 张国庆, 郭志忠. 输电断面潮流的 N-1 静态安全约束 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24(11):10-13.
LI Xiang, ZHANG Guoqing, GUO Zhizhong. N-1 principle steady state security restriction on power flow of transmission tie line group [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(11):10-13.
- [19] 王锐, 顾伟, 万秋兰, 等. 考虑二重预想事故的在线电压稳定预防控制 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10):62-66.
WANG Rui, GU Wei, WAN Qiulan, et al. Online preventive control for voltage stability considering supervenient contingency [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(10):62-66.

- [20] 吴政球,叶世顺,匡文凯,等. 电力市场日前 $N-1$ 安全校正模型及算法[J]. 电力自动化设备,2008,28(10):42-45.
WU Zhengqiu, YE Shishun, KUANG Wenkai, et al. Day-ahead $N-1$ security rescheduling model of power market and its algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(10):42-45.
- [21] 傅旭. 考虑不确定因素的电力系统静态安全预防控制[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):120-124.
FU Xu. Static security preventive control considering uncertainty factors for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2):120-124.
- [22] WEI H, SASAKI H, YOKOYAMA R. An application of interior point quadratic programming algorithm to power system optimization problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(1):260-266.
- [23] WEI H, SASAKI H, KUBOKAWA J, et al. An interior point nonlinear programming for optimal power flow problems with a novel data structure [C] //20th International Conference on Power Industry Computer Applications, 1997. Columbus, OH,

USA; [s.n.], 1997:134-141.

- [24] 李亚男,张粒子,杨以涵. 基于内点算法的电压校正控制[J]. 电力系统自动化,2002,26(3):28-31.
LI Yanan, ZHANG Lizi, YANG Yihan. Voltage corrective control based on interior point method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(3):28-31.

作者简介:



阳育德

阳育德(1971—),男,广西柳州人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统优化理论研究及计算(E-mail: yangyude@gxu.edu.cn);

冯彦维(1989—),男,广西玉林人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统静态安全稳定分析与计算(E-mail: feng_yanwei@qq.com);

韦 化(1954—),男,广西南宁人,教授,博士,主要研究方向为电力系统优化理论研究及计算(E-mail: weihua@gxu.edu.cn)。

Preventive static security control based on compensation method

YANG Yude, FENG Yanwei, WEI Hua

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

Abstract: Aiming at the huge memory occupation and low computation efficiency of the preventive static security control for large and complex power system, a fast optimized solution based on compensation method is proposed. The optimization mechanism of control calculation is analyzed, an equivalent model is established, the compensation method is applied in the fast analytic calculation of the postulated fault conditions, and the interior point method is adopted to solve the model, by which a rational operating mode satisfying the $N-1$ security criterion is obtained to prevent the system limit violation after $N-1$ contingency occurs. The tests for IEEE 30-, 118-, 300-bus systems and S-1047 system show that, the calculation efficiency of large scale preventive static security control is improved and the adjustment results satisfying the requirement of system secure and stable operation are rapidly and accurately obtained.

Key words: electric power systems; preventive static security control; postulated contingency; $N-1$; compensation method; interior point method; security; control