

基于参数化潮流模型的可用输电能力改进算法

罗 钢,石东源,陈金富

(华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要: 提出一种基于参数化潮流模型的大型互联电网可用输电能力改进算法。该方法建立在重复潮流法的框架下,利用连续潮流模型改进原有计算过程,通过主从迭代解决潮流分析中的收敛性与稳定性问题,并计及功率增长方向对结果的影响;约束校验过程中将故障参数化,通过建立连续潮流模型来辨别潮流无解时系统是否真实失稳;多断面功率控制过程中将断面功率参数化,建立连续潮流模型改进功率调整过程。通过 CEPRI 36 节点系统与实际大型互联电网的算例验证了所提算法的有效性以及对潮流收敛性较差系统的适应性。

关键词: 可用输电能力; 连续潮流法; 重复潮流法; 故障校验; 功率控制; 大型互联电网; 模型

中图分类号: TM 744

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.04.004

0 引言

在中国建设特高压同步互联电网^[1-6]的背景下,对于超大区域互联系统的运行与调度部门,可用输电能力(ATC)^[7-8]正逐渐成为年度/季度运行方式安排、日前调度计划制定、实时调度运行与控制所关注的重要指标。系统规模的扩大使得 ATC 计算的复杂性越来越高,对所采用算法的速度与精度也提出了更高的要求。

目前,在电力调度部门通常采用确定性的 ATC 计算方法,其基本过程可描述为:在功率注入空间中,从某一基本运行点出发,通过调整运行方式,在

多种静态约束与动态约束共同确定的安全域内搜索极限运行点,将该点所确定的断面传输功率作为极限传输功率。不同的极限运行点搜索方法形成了如下不同的 ATC 算法:

a. 最优潮流(OPF)法^[9-11]直接在安全域的边界上寻找理想的最优运行点,不考虑如何从基态到达该点,给出的是理想的目标方案,可能无法实现,且优化算法耗时较多;

b. 连续潮流(CPF)法^[12-14]在搜索过程中,沿预先确定的方向搜索到安全域边界上的某一点,即作为极限运行点,能够克服牛顿潮流法在电压稳定极限点的潮流不收敛问题,但预先确定的功率增长方向在计算过程中无法改变,所求结果忽略了发电和负荷的优化分布;

c. 重复潮流(RPF)法^[15-17]与 CPF 法类似,但其搜索过程无需明确指出搜索方向,具有一定的开放性,搜索结果可能是安全域边界上的任意一点,存在偶然性。

收稿日期:2013-05-09;修回日期:2014-01-18

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2009-CB219701);国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2011-AA05A101);国家自然科学基金资助项目(50937002)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2009CB219701),the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA05A101) and the National Natural Science Foundation of China(50937002)

Analysis methods for low-frequency oscillation eigenvalue of faulty system

MA Jing,PENG Mingfa,WANG Tong,YANG Qixun

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: Since the equilibrium-point eigenvalue method cannot correctly reflect the oscillation characteristics of faulty system and the trajectory eigenvalue method is difficult to set its window length,an eigenvalue analysis method suitable for faulty system is proposed,which equates the system after fault removing by mutual factor,calculates the post-fault current and power for each branch according to the branch currents of primal power grid and fault component grid,buils the equivalent system model,linearizes piecewise the model at each measuring point,and solves the chronological eigenvalue sequence of faulty system based on the measured disturbed trajectory. The simulative results of 2-generator system and 16-generator system show that the time-varying oscillation characteristics of faulty system are precisely described in real time.

Key words: electric power systems; fault equivalence; low-frequency oscillation; time-varying eigenvalue; model-trajectory method; stability; models

文献[18]针对大型互联电网的需求,充分发挥 RPF 法所具有的优势,改进其计算过程,提出了一种考虑方向性与风险性等多方面影响因素的 ATC 快速计算方法,但该方法未能解决以下 3 个方面问题:在 ATC 计算的功率调整过程中,极易出现潮流不收敛,导致计算效率低,且不能计算到真正的电压稳定极限点;在故障校验过程中,若故障后的稳态潮流不收敛,则只能简单地判定该故障下系统失稳,不能区分系统在故障后存在潮流解,且所采用的潮流计算工具无法找到该解的情形^[19];在多断面功率控制^[20]中,当断面功率和目标值相差较大时,RPF 法难以进行精确的功率调整,且极易出现潮流不收敛。

本文在文献[18]的基础上,将 RPF 法与 CPF 法相结合构建了主从迭代的改进算法,解决了潮流收敛性、稳定性以及功率调整的方向性问题,并将参数化潮流模型应用到故障校验与多断面功率控制中,解决了各自的收敛性问题。开发的软件在小型系统与大型互联电网中的应用算例验证了本文算法的有效性和实用性。

1 ATC 计算模型与改进算法

1.1 目标函数及约束条件

ATC 的计算模型可描述为:

$$\begin{aligned} \max \quad & f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{z}) \\ \text{s.t.} \quad & g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{z}) = 0 \\ & h(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{z}) \geq 0 \\ & (\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{z}) \in \Omega \end{aligned} \quad (1)$$

其中, f 为构成输电断面的各条线路传输功率求和函数; \mathbf{u} 和 \mathbf{x} 分别为控制变量和状态变量; \mathbf{z} 为电网的拓扑结构变量; g 和 h 分别表示等式和不等式约束; Ω 为被考察时段内电网可能出现的运行方式集合。

上述模型是在多种约束条件下,寻求使区域间联络线传输功率最大化的运行方式,并保证可实现由初始运行点到极限运行点的功率调整过程。所考虑的等式约束条件包含基态和故障后的稳态潮流方程,不等式约束条件包含基态和故障后的节点电压限制、发电机出力限制、线路容量极限、静态电压稳定约束以及暂态稳定约束等。

1.2 CPF 法与 RPF 法的特点

OPF 法、CPF 法与 RPF 法等多种算法被应用于求解式(1),其中后两者与 OPF 法相比,能够给出运行极限点的调整过程,保证计算结果的可实现性,且算法稳定,计算效率高,更适于在大型互联电网中应用。

图 1 所示为基于 CPF 法与 RPF 法的 ATC 计算过程示意图。图中, P_i 、 P_j 为节点的注入有功功率; M_1 为暂态安全域的边界; M_2 为静态安全域的边界; S_0 、

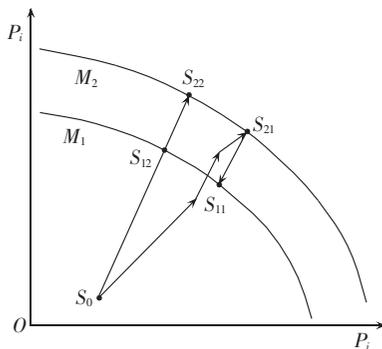


图 1 ATC 计算中的潮流轨迹

Fig.1 Power flow trajectories in ATC calculation

S_{11} 、 S_{12} 、 S_{21} 、 S_{22} 为系统运行状态点。 S_0 — S_{12} — S_{22} 是基于 CPF 法的潮流轨迹计算过程^[13], S_0 — S_{21} — S_{11} 是基于改进 RPF 法的潮流轨迹计算过程^[18],二者具有以下特点。

a. CPF 法从初始状态 S_0 出发,沿着预先确定的功率增长方向计算新的潮流解点,逼近静态/暂态约束极限点。该方法所求取的 ATC 结果将直接依赖于初始功率增长方向的选取,其计算结果只是一个可行解,而未必是系统运行人员真正关心的解。

b. RPF 法的功率增长过程中,其方向与步长均可灵活选择。文献[18]将潮流轨迹分解为若干段,每一段利用线性分布因子分别计算功率增长方向,由此逼近运行人员关心的方向,得到满足实际需求的 ATC 结果。但是,潮流问题本身是多解的,由 1 个稳定解和多个不稳定解组成^[21],基于 RPF 法的分段潮流轨迹计算过程无法保证从初始运行点沿着稳定的解曲线前进,可能在多组不稳定的解之间来回跳动,导致不合理的结果。为了提高计算效率而选取较大的功率增长步长时,极易造成潮流不收敛。此外,由于潮流雅可比矩阵奇异,RPF 法无法计算到真正的静态稳定极限点。

1.3 主从迭代的 ATC 改进算法

综上所述,CPF 法的功率增长过程能保证潮流解的稳定性与可实现性,但却存在方向性问题;RPF 法可以很好地解决方向性问题,但却无法保证潮流的收敛性与解的稳定性。为此,本文将 2 种方法进行融合,以 RPF 法为框架,将 CPF 法内嵌,构成了主从迭代的 ATC 改进算法。

1.3.1 RPF 法主迭代环节

RPF 法主迭代环节的核心是将潮流轨迹分解为若干段,逐段修正潮流调整方向与步长,进而逼近预设方向。分解后的 ATC 计算模型可描述为:

$$\begin{aligned} \max \quad & f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{z}) \\ \text{s.t.} \quad & g(\mathbf{x}_n, \mathbf{u}_n, \mathbf{z}_n) = 0 \\ & h(\mathbf{x}_n, \mathbf{u}_n, \mathbf{z}_n) \geq 0 \\ & (\mathbf{x}_n, \mathbf{u}_n, \mathbf{z}_n) \in \Omega \end{aligned} \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_n = \mathbf{u}_{n-1} + \Delta \mathbf{p}_n \mathbf{d}_n \quad (3)$$

其中, n 为迭代次数, $n=1, 2, \dots, N$; N 为最大迭代次数; \mathbf{d}_n 为第 n 次迭代时的功率单位增长量, 即功率调整方向; $\Delta \mathbf{p}_n$ 为第 n 次迭代时的功率调整步长。

式(3)中 \mathbf{d}_n 与 $\Delta \mathbf{p}_n$ 可通过优化算法^[22]或线性化^[18]的方法计算得到。考虑到 ATC 计算时既要保证系统的安全性也要保证系统的经济性, 文献[18]给出了3种在电网运行与调度中具有实际意义的功率调整方向: 最保守方向、乐观方向以及最经济方向, 运行人员可根据需要灵活选择。

RPF 法主迭代过程从初始潮流解点出发, 按照式(3)调整节点注入功率并求解潮流方程, 依次得到下一个潮流解点, 再校验式(2)给出的各种约束条件。对于任意迭代步, 如果潮流收敛, 则进行潮流合理性调整, 调节无功补偿设备或变压器变比, 将元件的越限电气量调整到允许的范围, 并重新计算潮流, 直至得到的潮流解点满足系统的运行要求, 由此保证潮流解的稳定性; 如果 RPF 法计算不收敛, 则可能是由于迭代步长过大或潮流接近静态稳定极限点, 此时 RPF 法计算存在困难, 转入 CPF 法迭代过程。

1.3.2 CPF 法从迭代环节

将 RPF 法第 n 个迭代步的 \mathbf{d}_n 与 $\Delta \mathbf{p}_n$ 作为 CPF 法计算的功率调整方向与调整目标, 建立参数化潮流模型:

$$\begin{cases} g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{z}, \lambda) = 0 \\ \mathbf{u}_n = \mathbf{u}_{n-1} + \lambda \Delta \mathbf{p}_n \mathbf{d}_n \\ (\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{z}, \lambda) \in \Omega \end{cases} \quad (4)$$

其中, λ 为连续化因子。

采用局部参数化方法^[23], 选取状态变量中变化最快的分量构造扩展方程:

$$(x_k^j - x_k^{j-1})^2 - (\Delta x_k^j)^2 = 0 \quad (5)$$

其中, x_k^j 为 CPF 法迭代过程中第 j 个潮流解点处状态变量 \mathbf{x} 中变化最快的分量 x_k 的取值; x_k^{j-1} 为第 $j-1$ 个潮流解点处 x_k 的取值; Δx_k^j 为第 j 个潮流解点处 x_k 的迭代步长。

式(4)中, $\lambda=0$ 与 RPF 法主迭代过程的第 $n-1$ 个解点相对应, $\lambda=1$ 则是第 n 次迭代的目标解点。联立式(4)、式(5), 进入 CPF 法从迭代过程, 通过预测环节-校正环节的迭代得到一系列随参数 λ 变化的潮流解点。如果能够找到 $\lambda \geq 1$ 的运行点, 则表明按照 \mathbf{d}_n 与 $\Delta \mathbf{p}_n$ 调整节点注入功率后系统仍然能够保持静态稳定, 在 $\lambda=1$ 的解点处结束从迭代过程, 返回 RPF 法主迭代过程。如果求取的 λ 最大值小于 1, 则表明系统已到达鼻点, 由此求得了系统的静态电压稳定极限点, 返回主迭代过程。

需要指出的是, 为了尽可能减少约束校验的次数, 满足在线计算的要求, 在 CPF 法的从迭代过程

中, 对于中间潮流解点并不进行静态与暂态约束校验, 仅对返回主迭代过程的最终解点进行校验。

主从迭代的 ATC 改进算法保持了 RPF 法灵活开放的特点, 并利用 CPF 法提高了算法鲁棒性, 不仅解决了各自算法的缺陷, 而且具有较高的计算效率。计算流程如图 2 所示。

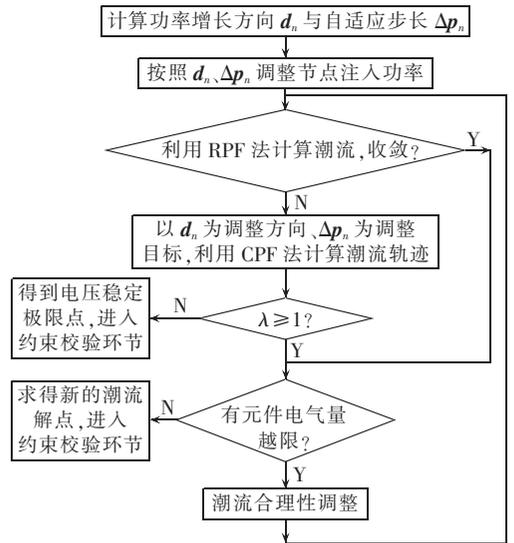


图 2 潮流解点计算流程图

Fig.2 Flowchart of power flow point calculation

1.4 基于 CPF 法的静态约束校验

获取潮流解点后, 需要校验基态与故障后系统能否保持静态稳定性, 并在此基础上检验静态安全性约束是否满足。对于预想故障集下的 $N-1$ 核校, 如果潮流不收敛, 则难以准确判断系统故障后的静态稳定性。这是由于系统故障后无法找到稳态潮流解的情形有 2 种: 一种是系统确实失稳; 另一种是系统在该故障下存在潮流解, 但所采用的潮流计算工具无法找到该解。如果简单地判定系统失稳, 则可能造成误判。为此, 本文将电网拓扑结构变量参数化, 构建连续潮流模型来区分上述情形, 如下式所示:

$$\begin{cases} g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{z}, \lambda) = 0 \\ \mathbf{z}_i = \mathbf{z}_{i0}(1 - \lambda) \end{cases} \quad (6)$$

其中, \mathbf{z}_{i0} 为元件故障前的参数。

式(6)中, $\lambda=0$ 与系统无故障的潮流状态相对应, $\lambda=1$ 与该元件故障后被完全切除的系统状态相对应。式(6)与式(5)联立构成扩展参数化潮流方程, 利用 CPF 法求解该模型, 如果能找到 $\lambda \geq 1$ 的稳态运行点, 则表明该故障下系统能够保持静态稳定, $\lambda=1$ 即是故障后的稳态潮流解; 如果求取的 λ 最大值小于 1, 则可判定该故障下系统将失去静态稳定。

1.5 基于 CPF 法的多断面功率控制

多断面功率控制是在大型互联电网中调整多个联络断面的功率至指定值, 应用于 ATC 计算中考察相关断面对指定断面功率传输的影响。然而, 现有计

算方法在当前断面功率与目标功率偏差较大时,功率控制过程极易出现潮流不收敛,导致计算时间与调整精度难以满足运行人员的需求。为此,本文将断面功率参数化,建立 CPF 模型来解决上述问题。下文以单断面功率控制为例,多断面功率控制只需构建类似的扩展潮流方程联立求解。

首先,确定参与调整的发电机与负荷群,计算功率调整方向,在此基础上构建系统的潮流方程及与被控断面相关的有功功率偏差方程,如下式所示:

$$\begin{aligned} g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{z}, \lambda) &= 0 \\ \mathbf{u} &= \mathbf{u}_0 + \lambda \mathbf{d} \\ \sum_{k \in L} P_1(k) - (1 - \gamma)P_{S_0} - \gamma P_{S_1} &= 0 \\ \mathbf{u}_{\min} &\leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}_{\max} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, L 为组成被控断面的线路集合; $P_1(k)$ 为当前潮流状态下线路 k 的有功功率; P_{S_0} 、 P_{S_1} 分别为被控断面的初始有功和目标有功功率; \mathbf{u}_0 为控制变量的初始值; \mathbf{d} 为功率调整方向; γ 为参数化因子。

式(7)中, $\gamma=0$ 为初始潮流状态, $\gamma=1$ 为潮流调整的目标状态。将式(7)与式(5)联立构成扩展参数化潮流方程,其中 λ 看作与 \mathbf{x} 类似的状态变量,而 γ 作为被求的连续化参数。利用 CPF 法求解上述模型,如果能够找到 $\gamma \geq 1$ 的运行点,则表明可以将断面功率控制在目标值,且 $\gamma=1$ 对应的潮流解即是目标状态;如果求取的 γ 最大值小于 1,系统已到达鼻尖,则表明调节指定的发电机/负荷群并且在预先计算的功率增长方向下不能将断面功率调整到目标值,需要重新选定可调元件或改变功率增长方向。

2 ATC 改进算法流程

构建大型互联电网计及静态与暂态安全稳定约束的 ATC 计算流程,如图 3 所示,主要包含多断面功率控制、潮流解点计算、静态安全与稳定约束校验、暂态稳定约束校验 4 个部分。前 3 个部分已在第 1 节讨论,本文所考虑的暂态稳定约束是指预想故障集下的暂态稳定性,采用时域仿真法校核。考虑到暂态稳定的时域仿真耗时较长,本文优化了约束校验过程。如图 1 所示的潮流轨迹 $S_0-S_{21}-S_{11}$,从 S_0 计算到 S_{21} 的过程中仅校核静态安全、稳定约束,得到静态极限点 S_{21} 后,再校验暂态稳定,并反向调整节点注入功率,直至暂态稳定极限点 S_{11} ,由此大幅减少了暂态稳定的校核次数,缩短了计算时间。

3 算例及分析

3.1 小型电网算例

在 CEPRI 36 节点系统上测试本文提出的改进算法,系统接线如图 4 所示,区域 1 与区域 3 分别经

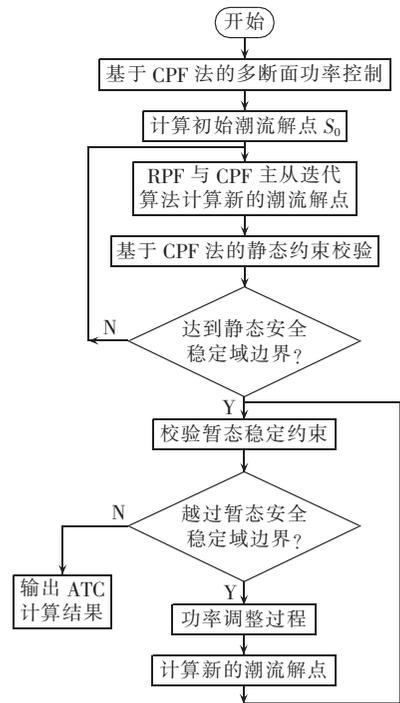


图 3 ATC 计算流程图

Fig.3 Flowchart of ATC calculation

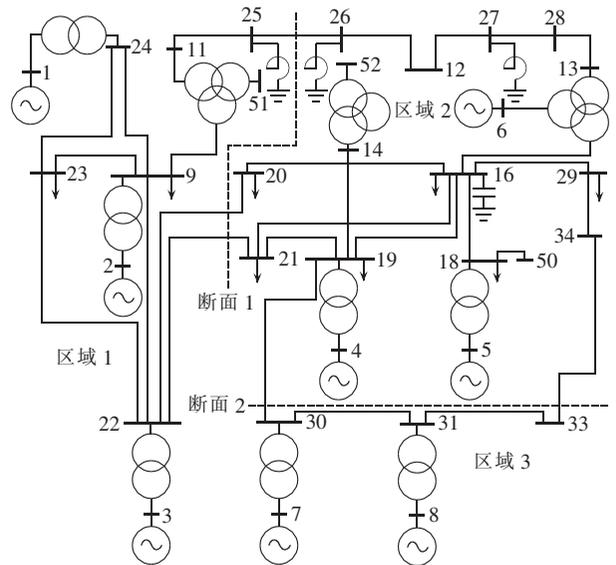


图 4 CEPRI 36 节点系统分区图

Fig.4 Partition diagram of CEPRI 36-bus system

断面 1 和断面 2 向区域 2 送电。在系统送端的发电机母线 2、3、7、8 处各增加一台发电机。计算某断面 ATC 时,通过增加送端发电机出力、减少受端发电机出力来调整断面功率,同时保持外部区域的发电机出力不变。

a. ATC 计算结果与过程分析。

表 1 给出断面 1、断面 2 在不同功率增长方向下的 ATC 计算结果。表 2 给出断面 1 计算中,区域 1 与区域 2 的发电机有功功率调整结果,表中 G_1 表示与母线 1 相连的发电机,其他类似, G_{2-1} 与 G_{3-1} 为原有发电机, G_{2-2} 、 G_{3-2} 为新增发电机。按照保守、乐观、

表 1 3 种功率增长方向下的 ATC 结果

Tab.1 Results of ATC calculation for three power augment directions

断面	初始有功/ MW	ATC/MW		
		保守方向	经济方向	乐观方向
1	611.6	347.5	378.7	477.2
2	531.4	702.2	703.7	725.4

表 2 发电机有功功率调整结果

Tab.2 Results of generator active power adjustment

发电机	初始有功/ MW	ATC/MW		
		保守方向	经济方向	乐观方向
G ₁	622.6	737.1	721.3	755.3
G ₂₋₁	600.0	600.0	600.0	600.0
G ₂₋₂	0	212.5	93.3	212.5
G ₃₋₁	310.0	310.0	310.0	310.0
G ₃₋₂	0	53.1	212.5	185.9
G ₄	160.0	160.0	160.0	0
G ₅	430.0	164.3	124.1	191.5
G ₆	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0

经济的功率增长方向得到的 ATC 计算结果不同,各方向下的发电机有功功率调整结果也存在较大差异。主要原因是不同的方向对应调整过程中不同的发电机有功功率分配比例,反映出不同的发电机对系统静态、暂态安全稳定约束的影响程度不同。因此,本文算法在主迭代过程中考虑方向性影响对于电网运行与调度具有实际意义,克服了 CPF 法在功率调整方向上的缺陷。

在断面 1 采用乐观方向计算 ATC 时,当发电机 G₂₋₂ 与 G₃₋₂ 有功功率分别从 0 增加到 212.5 MW 与 215 MW 时,利用 RPF 法迭代计算时,潮流不收敛;进入 CPF 法的迭代过程,求取的功率增长因子最大值为 0.94 < 1,此时系统已经达到静态电压稳定极限点,对应的断面传输功率增长量即是所求 ATC 结果。由此可见,本文的改进算法克服了 RPF 法在潮流不收敛时遇到的困难,且能计算到真正的电压稳定极限点。

b. 故障校验分析。

全网的 17 条交流线路构成系统的 N-1 故障集,其中线路 25-26 在初始状态下开断即造成系统失稳,从故障集中剔除。在断面 1 的 ATC 计算过程中,对某个潮流解点进行 N-1 电压稳定约束校验时,发现其中 3 条线路开断将导致潮流无解,分别是线路 19-30、23-24、27-28。对这些线路采用 CPF 模型计算连续化因子最大值 λ_{max} 的结果分别为 0.87、1.24、1.15。其中,线路 23-24、27-28 的 λ_{max} 大于 1,故开断这 2 条线路时系统实际上能够保持电压稳定性,而线路 19-30 的 λ_{max} 小于 1,该故障是真实的系统失稳故障。由此可见,本文故障校验模型能够很好地区分计算过程中潮流无解所对应的 2 种情形。

c. 断面功率控制分析。

断面 1 传输的初始有功为 611.6 MW,设定控制目标为 1000 MW,选取待调整的控制变量为区域 1 与区域 2 的发电机出力。选取功率增长方向为保守方向,则采用本文的断面功率控制方法求得断面功率参数化因子 γ 的最大值为 0.83 < 1,可知按照保守方向无法将断面 1 的传输功率调整到目标值。重新选定乐观的功率调整方向,此时 γ 最大值为 1.25 > 1,可知按照乐观方向可实现断面 1 的调整目标,γ=1 对应的潮流解点即是所求目标状态。

3.2 大型互联电网算例

在华北—华中联网系统上测试本文的改进算法。联网系统规模为:节点约 15000 个,发电机约 1600 台,交流线路总计约 20000 条,变压器总计约 20000 台,直流线路 12 条。其中华中电网以三峡水电站为中心辐射 5 省 1 市,共 6 个主要断面。在夏季水电大发时,华中电网经特高压断面向华北电网输送有功功率 2058 MW,图 5 为系统结构及初始潮流示意图,图中数据单位为 MW。

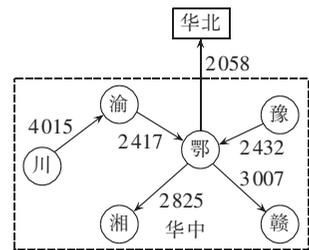


图 5 华北—华中联网系统结构图

Fig.5 Structure of North China-Central China Power Grid

采用以下 3 种算法分别计算特高压断面的 ATC。

算法 1:本文所提出的改进算法,控制华中电网内部各联络断面的传输功率到指定值,按照保守方向调整节点注入功率。

算法 2:文献[18]提出的改进 RPF 法,不控制其他断面的功率,按照保守方向调整节点注入功率。

算法 3:文献[13]提出的 CPF 法,控制华中电网内部各断面的传输功率到指定值,按照预先确定的保守方向调整节点注入功率,并保持该方向不变。

计算结果及耗时见表 3。易见,3 种算法的计算速度都较快,能够满足实际电网的在线计算需求。

表 3 特高压断面的 ATC 计算结果

Tab.3 Results of ATC calculation for UHV cross-section

算法	特高压断面 ATC/MW	华中内部联络断面的传输功率/MW					耗时/ min
		渝鄂	川渝	鄂豫	鄂湘	鄂赣	
1	686	2700	4300	2400	2900	3000	3.8
2	580	2442	4029	2451	2819	3004	2.1
3	793	2700	4300	2400	2900	3000	4.5

算法 1、算法 3 的 ATC 结果受暂态稳定限制,算法 2 的结果受静态稳定限制。这是由于该系统对于普通牛顿潮流算法的收敛性较差。采用算法 2,当特

高压断面传输功率达到 2638 MW 后,继续增加送端节点注入功率则潮流不收敛,此时算法 2 判定系统已达到静态稳定极限,而对该点进行的暂态稳定校验全部通过,最终得到受静态稳定限制的 ATC 结果。然而,采用算法 1、算法 3 时,CPF 模型能够计算到真正的静态电压稳定极限点,分别为 3 017 MW、3 062 MW,此时预设故障下的暂态稳定校核不通过,即暂稳越限,按照算法流程应反向计算,逼近暂态稳定极限点,得到最终断面传输极限分别为 2 744 MW、2 851 MW。由此可见,本文的改进算法对于潮流收敛性较差的系统同样适用,且能够计算到真正的静态稳定极限点,而直接采用 RPF 法的算法 2 在潮流收敛性较差系统中计算时得到了不正确的 ATC 结果。

最保守的功率增长方向实际上是只考虑系统的安全性要求,求取最不利情况下的 ATC 最小值。而表 3 中,算法 1 的结果小于算法 3,说明算法 1 得到了更加不利情况下的 ATC 结果,更符合运行人员的实际需求。造成上述结果的原因是算法 3 受限于 CPF 法的功率调整过程,仅根据初始潮流状态选取保守的功率增长方向,并在计算过程中保持不变,而该方向与实际系统的最保守功率增长方向存在偏差,将造成 ATC 结果偏大。而算法 1 计算过程中不断根据新的潮流解点调整功率增长方向,由此逼近最保守方向,所求结果也更加接近真实的最保守方向下的 ATC。由此进一步验证了改进算法相比于 CPF 法在功率调整方向上所具有的优越性。

综上所述,本文的改进算法同时克服了 RPF 法与 CPF 法的缺陷,对于大型互联电网具有较好的适应性。

4 结论

在中国建设特高压大型同步互联电网的背景下,本文从区域电网运行与调度的实际需求出发,提出了一种基于参数化潮流模型的大型互联电网 ATC 快速计算方法。该模型充分发挥了 RPF 法与 CPF 法的优势,在功率调整过程、潮流解点计算、约束校验以及多断面功率控制等方面利用参数化潮流模型改进了原有算法,解决了功率调整方向性、潮流收敛性、潮流解点稳定性等问题。改进算法能充分考虑多种影响因素,计算速度快,且对潮流收敛性较差的系统也具有较好的适应性。最后,通过算例验证了本文改进算法的有效性与实用性。

参考文献:

[1] 张文亮,周孝信,印永华,等. 华北—华中—华东特高压同步电网构建和安全性分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(16):1-5.
ZHANG Wenliang,ZHOU Xiaoxin,YIN Yonghua,et al. Composition and security analysis of "North China-Central China-East

China" UHV synchronous power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16):1-5.

[2] 舒印彪,张文亮,周孝信,等. 特高压同步电网安全性评估[J]. 中国电机工程学报,2007,27(34):1-6.
SHU Yinbiao,ZHANG Wenliang,ZHOU Xiaoxin,et al. Security evaluation of UHV synchronized power grid[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(34):1-6.

[3] 赵良,郭强,覃琴,等. 特高压同步电网稳定特性分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(34):47-51.
ZHAO Liang,GUO Qiang,QIN Qin,et al. Analysis on stability characteristics of UHV synchronized power grid[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(34):47-51.

[4] 云雷,刘涤尘,廖清芬,等. 基于支路暂态能量函数的特高压区域电网间容量交换能力研究[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):7-12.
YUN Lei,LIU Dichen,LIAO Qingfen,et al. Power exchange capacity among UHV power grids based on branch transient energy [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(3):7-12.

[5] 刘新东,陈焕远,姚程,等. 基于非线性方法抑制特高压联络线功率波动的控制策略仿真[J]. 电力自动化设备,2012,32(4):92-95.
LIU Xindong,CHEN Huanyuan,YAO Cheng,et al. Simulation of power control strategy based on nonlinear method for UHV tieline[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(4):92-95.

[6] 徐国丰,黄民翔,韩辉,等. 基于 RAMSES 的特高压电网可靠性充裕度评估[J]. 电力自动化设备,2012,32(4):99-102,124.
XU Guofeng,HUANG Minxiang,HAN Hui,et al. Reliability adequacy evaluation based on RAMSES for UHV power grid [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(4):99-102,124.

[7] 崔雅莉,别朝红,王锡凡. 输电系统可用传输能力的研究[J]. 电力自动化设备,2003,23(4):70-75.
CUI Yali,BIE Zhaohong,WANG Xifan. Study on available transfer capability[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(4):70-75.

[8] North American Electric Reliability Council. Available transfer capability definitions and determination;a framework for determining available transfer capabilities of the interconnected transmission networks for a commercially viable electricity market[R]. Princeton,New Jersey,USA:North American Electric Reliability Council,1996.

[9] 刘明波,夏岩,吴捷. 计及暂态稳定约束的可用传输容量计算[J]. 中国电机工程学报,2003,23(9):28-33.
LIU Mingbo,XIA Yan,WU Jie. Calculation of available transfer capability with transient stability constraints[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(9):28-33.

[10] HAKIM L,KUBOKAWA J,YUE Yuan,et al. A study on the effect of generation shedding to total transfer capability by means of transient stability constrained optimal power flow [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2009,24(1):347-355.

[11] 邱威,张建华,刘念,等. 电压稳定约束下最优潮流的多目标优化与决策[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):34-38.
QIU Wei,ZHANG Jianhua,LIU Nian,et al. Multi-objective optimization and decision making of voltage stability constrained optimal power flow[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(5):34-38.

[12] 许琦. "N-1"预想事故下满足静态电压稳定约束的快速 ATC 算法[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):81-85.
XU Qi. Fast ATC algorithm with voltage stability constraint for

- $N-1$ contingency[J]. Electric Power Automation Equipment,2011, 31(8):81-85.
- [13] 郭琦,赵晋泉,张伯明,等. 一种线路极限传输容量的在线计算方法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(5):1-5.
- GUO Qi,ZHAO Jinqun,ZHANG Boming,et al. A method for on-line computation of total transfer capability[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(5):1-5.
- [14] 王成山,李慧聪,魏炜,等. 考虑电压稳定性约束的输电能力综合计算[J]. 电力自动化设备,2004,24(1):9-13.
- WANG Chengshan,LI Huicong,WEI Wei,et al. Integrative computation of transfer capability with voltage stability constrain [J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(1):9-13.
- [15] 丁平,周孝信,严剑峰,等. 考虑合理安全原则的大型互联网在线传输极限计算[J]. 中国电机工程学报,2010,30(22):1-6.
- DING Ping,ZHOU Xiaoxin,YAN Jianfeng,et al. Calculation of online total transfer capability in bulk interconnected grid integrating rationality and security principle[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(22):1-6.
- [16] OU Y,SINGH C. Assessment of available transfer capability and margins[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2002,17(2):463-468.
- [17] GRAVENER M H,NWANKPA C. Available transfer capability and first order sensitivity[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1999,14(2):512-518.
- [18] 石东源,罗钢,陈金富,等. 考虑方向性和风险性的大型互联网可用输电能力快速计算[J]. 中国电机工程学报,2012,32(34):58-66.
- SHI Dongyuan,LUO Gang,CHEN Jinfu,et al. Fast calculation of available transfer capability in bulk interconnected grid considering directions and risks[J]. Proceedings of the CSEE, 2012,32(34):58-66.
- [19] FLUECK A J,DONDETI J R. A new continuation power flow tool for investigating the nonlinear effects of transmission branch parameter variations[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2000,15(1):223-227.
- [20] 丁平,周孝信,严剑峰,等. 大型互联网多断面功率约束潮流算法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(10):8-15.
- DING Ping,ZHOU Xiaoxin,YAN Jianfeng,et al. Algorithm of power flow for bulk interconnected grid with transmission interface power constraints[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(10):8-15.
- [21] AJJARAPU V,CHRISTY C. The continuation power flow:a tool for steady state voltage stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1992,7(1):416-423.
- [22] 孙欣,夏清. 基于交易空间的可用传输容量计算方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(10):11-15.
- SUN Xin,XIA Qing. Calculation of available transfer capability in transaction space[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009,33(10):11-15.
- [23] 李增国,王锐,邢卫荣. 基于连续潮流和模态分析的电压稳定分析[J]. 电力自动化设备,2009,29(9):81-84.
- LI Zengguo,WANG Rui,XING Weirong. Voltage stability analysis based on continuation power flow and modal analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(9):81-84.

作者简介:



罗钢

罗钢(1987-),男,四川广元人,博士研究生,主要研究方向为电力系统分析与计算等(E-mail:luoganghust@163.com);

石东源(1974-),男,湖南邵阳人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统分析与计算、电力系统软件技术等;

陈金富(1972-),男,福建莆田人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统分析、运行以及 FACTS 应用技术等。

Improved available transmission capability algorithm based on parameterized power flow model

LUO Gang,SHI Dongyuan,CHEN Jinfu

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430074,China)

Abstract: In order to calculate the available transmission capability of large scale interconnected power grid,an improved algorithm based on the parameterized power flow model is proposed in the framework of repeated power flow algorithm,which adopts continuous power flow model to enhance the primal calculation process,improves the convergency and stability of power flow analysis by alternate iteration and considers the impact of power augment direction on the calculative results. The fault is parameterized during constraint check and the continuous power flow model is built to detect if the system is really instable when the power flow is unsolvable. The cross-section power is parameterized during multi-section power control process and the continuous power flow model is built to improve the control process. Case study is carried out for CEPRI 36-bus system and a practical large scale interconnected power grid,which shows the effectiveness of the proposed algorithm and its adaptability to system of poor power flow convergency.

Key words: available transmission capability; continuous power flow method; repeated power flow method; fault check; power control; bulk interconnected grid; models