

大规模电力系统潮流计算收敛性诊断与调整方法

安 军¹, 宋俊达¹, 葛维春²

(1. 东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室, 吉林 吉林 132012;
2. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006)

摘要:在对大规模电网进行潮流仿真时,容易出现潮流计算不收敛的情况。针对潮流计算不收敛时难以定位关键影响因素的问题,通过分析迭代中间数据的变化规律,建立判别潮流计算收敛性的指标,提出一种导致潮流计算不收敛关键因素的辨识方法,并基于潮流收敛域,对辨识得到的关键因素进行修正,为运行人员进行潮流调整提供直观的参考依据。通过对某省220 kV及以上电压等级电网和欧洲13659节点系统进行仿真计算,验证了所提方法的有效性。

关键词:大规模电力系统;潮流计算;收敛性;迭代中间信息;潮流收敛域

中图分类号:TM 711

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201912031

0 引言

潮流计算对电网的规划设计和优化运行具有重要的意义^[1-2]。随着我国电网规模的不断扩大,不同区域间电网互联更加紧密,电网负荷加剧。对于这种具有重负荷的大规模电力系统而言,容易出现潮流计算不收敛的情况。目前的规划和运行人员只能凭借经验对潮流数据进行调整,缺乏一套系统的、行之有效的潮流调整方法^[3-4]。

导致潮流不收敛的因素众多,包括算法、模型参数和注入数据等,由于牛顿类方法在求解潮流问题时已获广泛应用,且电网参数均已经过多次校正,工程上通常认为注入数据的不合理是造成潮流不收敛的重要原因^[5-6]。对于大规模电力系统分析而言,如何从众多注入数据中定位影响潮流收敛性的关键数据,并给出调整策略,从而提高潮流收敛性,是一项颇有价值的研究。

现有关于影响潮流收敛性关键因素辨识方面的研究尚未形成统一的理论体系。文献[7]将潮流不收敛的原因归结为某几条薄弱输电通道的输送功率超过了其输送极限,通过降出力的方法求取薄弱输电通道;文献[8-9]将潮流不收敛的原因归结为局部无功支撑不足和断面潮流过重,并提出了利用迭代过程中电压幅值和相角的衰减指标识别潮流的病态特征;文献[10]提出一种先将PQ节点设置为PV节点,再根据缺额指标逐步将其恢复为PQ节点的思路,根据定义的功率缺额指标判断相应位置的无功

功率缺额。

在潮流收敛性的调整策略研究方面,主要有灵敏度分析、特征值分析、最优潮流等几类潮流调整方法。文献[7]根据电压相角对有功注入的灵敏度关系对发电机进行控制;文献[8]通过最优潮流手段调整系统无功从而获取可行解;文献[11]结合快速解耦法和直流法的思路,提出了一种具有虚拟中性点的潮流估算模型。除此之外,在牛顿法的基础上还形成了规划类方法^[12]、同伦法^[13]、最优乘法^[14]、Levenberg-Marquard方法^[15-16]等多种改良的计算方法,提升了算法的计算能力,扩大了潮流计算的收敛区间。

然而现有研究所提的调整方法侧重强调发电节点对全网功率的补偿,缺乏针对关键注入数据的直接辨识与调整策略。本文将迭代过程中控制变量的变化情况作为关键数据的诊断标准,通过对比潮流迭代中计算量与注入数据之间的误差关系,辨识引起潮流不收敛的关键数据;并将潮流收敛域引入潮流数据的评价与修正当中,以潮流计算收敛为边界条件,求取当前运行状态下能使潮流收敛的最大负荷,获得潮流收敛域边界,借助数据点与收敛域边界的位置关系对关键数据进行修正。

1 收敛性诊断与关键因素辨识

1.1 牛顿-拉夫逊法的计算原理

牛顿-拉夫逊法是一种常用的求解非线性方程的方法,已经被广泛地应用于潮流计算当中。牛顿-拉夫逊法潮流计算的核心思想是忽略泰勒展开后潮流方程的高次项,将非线性方程线性化。再通过选取合适的初值,经过多次迭代后逐步向真值逼近。牛顿-拉夫逊法的修正方程如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{ij} & N_{ij} \\ J_{ij} & L_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta U_i / U_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

收稿日期:2019-04-19;修回日期:2019-11-01

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51877034);国家电网公司科技项目(LNDL2017-04PT-GC)

Project supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China(51877034) and the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(LNDL2017-04PT-GC)

其中, ΔP_i 、 ΔQ_i 分别为各节点有功、无功不平衡量; $\Delta \delta_i$ 、 $\Delta U_i/U_i$ 分别为电压相角、幅值修正量; H_{ij} 、 N_{ij} 、 J_{ij} 、 L_{ij} 为相应不平衡量对修正量的偏导数。

为了方便描述, 将式(1)改写为如下矩阵形式:

$$\Delta \mathbf{y}^{(k)} = \mathbf{J} \Delta \mathbf{x}^{(k)} \quad (2)$$

其中, \mathbf{J} 为雅可比矩阵; k 为迭代次数。

潮流迭代的中间过程数据蕴含着电网的重要信息。孤立地看, 每次潮流迭代的求解结果都能够代表一个独立的潮流形式(即每一节点的电气量关系满足物理规律, 冗余功率皆由平衡节点承担), 但由于计算结果与注入数值之间的误差无法满足精度要求, 所以才需要进行反复迭代。因此, 从连续上看, 2次迭代之间数据的变化情况能够反映潮流方程的收敛能力。如果迭代过程中的计算数据逐渐趋近于注入数据, 说明此迭代过程正在向收敛方向发展, 潮流收敛的可能性较大。

1.2 潮流收敛性诊断

牛顿法计算过程中, $\Delta \mathbf{y}^{(k)}$ 作为各节点功率的不平衡量, 体现了迭代过程中各节点功率的计算值与注入数据之间误差的变化情况。对于收敛的潮流而言, $|\Delta \mathbf{y}^{(k)}|$ 中的各个量在迭代过程中应逐渐趋于减小, 而当潮流迭代难以收敛时, $|\Delta \mathbf{y}^{(k)}|$ 则会发生振荡甚至突变, 始终无法满足精度要求。

将计算过程中每次迭代 $|\Delta \mathbf{y}^{(k)}|$ 的绝对值最大值记作 E_{\max} 。当 E_{\max} 在迭代过程中逐渐趋于减小时, 潮流计算就朝着收敛方向发展; 当 E_{\max} 最终减小至满足精度要求时, 潮流计算判定为收敛; 若 E_{\max} 出现振荡并在规定的迭代次数下始终无法减小至满足精度要求, 则潮流计算不收敛。

$$E_{\max}^{(k)} = \max |\Delta \mathbf{y}^{(k)}| \quad (3)$$

收敛条件为:

$$\lim_{k \rightarrow k_{\max}} (E_{\max}^{(k+1)} - E_{\max}^{(k)}) = \mu \quad (4)$$

其中, k_{\max} 为预设的最大迭代次数; μ 为预设的迭代求解精度。

1.3 关键因素辨识方法

本文借助 $\Delta \mathbf{y}^{(k)}$ 反映功率计算值与注入数据之间的误差特性, 提出一种辨识潮流不收敛关键因素的方法。

由迭代原理可知, 在牛顿法潮流计算过程中, $\Delta \mathbf{x}^{(k)}$ 与 $\Delta \mathbf{y}^{(k)}$ 都能够体现潮流解的精度, 但两者所代表的意义有所不同。

迭代过程如图1所示, 在二元方程中, \mathbf{y}^* 为方程 $\mathbf{y} = f(\mathbf{x})$ 的准确解, 将 $\mathbf{x}^{(k)}$ 作为迭代初值代入方程, 解为 $f(\mathbf{x}^{(k)})$, 计算量与真值之间的差值 $\mathbf{y}^* - f(\mathbf{x}^{(k)})$ 即为 $\Delta \mathbf{y}^{(k)}$, 再根据切线方向计算自变量的更新值 $\mathbf{x}^{(k+1)}$, 自变量更新值与初值之间的差 $\mathbf{x}^{(k+1)} - \mathbf{x}^{(k)}$ 即为 $\Delta \mathbf{x}^{(k)}$, 重

复上述计算过程, 直至满足求解精度。

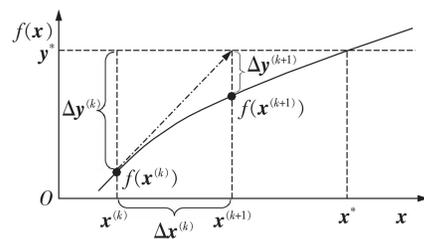


图1 迭代过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of iterative process

在该计算过程中, $\Delta \mathbf{x}^{(k)}$ 表示状态变量在2次迭代计算之间变化的差值, 当 $|\Delta \mathbf{x}^{(k)}|$ 逐渐趋于减小时, 其能够反映状态变量的变化情况逐渐趋于稳定; 而 $\Delta \mathbf{y}^{(k)}$ 则表示计算值与真值间的误差, 对于含有2个自变量以上的方程组而言, 计算值与真值间的误差就由 $|\Delta \mathbf{y}^{(k)}|$ 中的最大值决定, 当 $|\Delta \mathbf{y}^{(k)}|$ 逐渐趋于减小时, 说明在该迭代过程中的迭代计算量正逐渐向注入数据方向逼近。相较于 $\Delta \mathbf{x}^{(k)}$, $\Delta \mathbf{y}^{(k)}$ 更具有明确的实际意义。因此, 本文根据 $|\Delta \mathbf{y}^{(k)}|$ 的最大值建立评价指标 E_{\max} , 表示该次迭代中功率计算值与注入数据之间的最大误差, E_{\max} 越大, 表示在该次迭代下的计算值较注入数据之间的误差越大; 相反地, E_{\max} 越小, 则表示在该次迭代下的计算值越接近于注入数据。

取计算过程中 E_{\max} 最小的一次迭代, 则该次迭代的计算值最接近于注入数据, 若此时 E_{\max} 表示有功偏差量, 则认为该系统有功数据存在问题, 无功数据不做改动; 若此时 E_{\max} 表示无功偏差量, 则认为该系统无功数据存在问题, 有功功率数据不做改动。通过观察此时 $|\Delta \mathbf{y}^{(k)}|$ 中较大的变量, 说明当计算值最接近于注入数据时, 这些变量仍然难以收敛, 从而辨识得到导致潮流不收敛的关键因素。

2 基于潮流收敛域的关键数据修正方法

域的方法已经被广泛地应用于电力系统的安全性分析和稳定性分析中。其核心思想是利用电力系统的各种等式或不等式约束条件, 如功率平衡约束、电压幅值约束、传输功率约束等, 求取满足上述约束条件下的域边界, 再将当前运行点与域边界进行位置比较, 从而分析电网在当前运行条件下的相应特性。域的方法所具有的直观性特点能够为调度人员实施调度策略提供直接参考。

潮流收敛域是指所有满足潮流计算收敛条件的运行点数据的集合。

根据辨识得到的潮流不收敛关键因素, 以潮流计算收敛为边界条件刻画潮流收敛域。以数据点相对于收敛域边界的位置关系, 提供数据的修正方案。

当数据点位于收敛域之内时,潮流计算收敛;当数据点位于收敛域之外时,潮流计算不能收敛。当潮流计算不收敛,即数据点位于收敛域之外时,修正数据点的数值,将数据点拉入收敛域之内,这样就实现了通过修正关键控制变量将不收敛的潮流调至收敛的目的。

2.1 潮流收敛域的刻画

假设辨识得到的关键因素为节点 i, j 的有功功率 P_i, P_j , 则以 P_i 为横轴、 P_j 为纵轴, 以潮流收敛为边界条件, 绘制潮流收敛域, 具体步骤如下:

(1) 置 $P_j=0$, 以定步长将 P_i 由 0 增长至潮流不收敛, 得到 $P_j=0$ 时 P_i 的最大值 P_{imax} , 则 P_{imax} 为收敛域在横轴上的最大值;

(2) 在区间 $[0, P_{imax}]$ 内, 等距离地插入 n 个节点 $P_i^{(k)} (k=1, 2, \dots, n)$, 利用二分法探寻每个 $P_i^{(k)}$ 下致使潮流不收敛的 P_j 的最大值 $P_{jmax}^{(k)}$, 从而得到 n 个潮流收敛域的边界点;

(3) 将上述边界点拟合成曲线, 该曲线即为潮流收敛边界, 边界与坐标轴所围成的区域即为潮流收敛域, 收敛域之外的区域称为不收敛区域。

同理可绘制三维空间下的潮流收敛域。对于更高维度的空间, 也可以借助向量进行表示, 但高于二维的收敛域不利于分析后续的潮流修正, 因此当辨识得到的关键因素多于 2 个时, 可以绘制多个二维域分别进行分析。

2.2 数据修正方案

基于数据点当前所处的区域, 根据不同的修正目标可相应地改变数据的修正措施。

2.2.1 以修正单个数据为目标

以收敛边界与坐标轴的交点所在的位置, 垂直于坐标轴做垂线, 可将不收敛区域划分成 I—IV 这 4 个区域, 如图 2 所示。

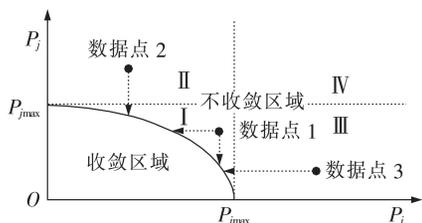


图 2 以修正单个数据为目标时的数据修正方案

Fig.2 Data correction scheme with goal of correcting individual data

(1) 当数据点处于区域 I 时, 以数据点 1 为例, 由于数据点未超过收敛边界的最大值, 单独修正其横、纵坐标轴的任意一个量均可使潮流收敛。对比数据点相对于收敛边界的横向和纵向距离, 取最短的距离作为此数据点的潮流修正措施。

(2) 当数据点处于区域 II 时, 以数据点 2 为例,

由于此时的数据点超过了收敛边界在纵轴上的最大值 P_{jmax} , 如果单独修正数据 P_i 已无法使潮流重新达到收敛, 因此将 P_j 作为修正量。以数据点到收敛边界的纵向距离作为此时 P_j 的修正量。

(3) 当数据点处于区域 III 时, 以数据点 3 为例, 由于此时的数据点超过了收敛边界在横轴上的最大值, 如果单独修正数据 P_j 已无法使潮流重新达到收敛, 因此将 P_i 作为修正量。以数据点到收敛边界的横向距离作为此时 P_i 的修正量。

当以修正单个数据为目标时, 易于求取平行于坐标轴的边界点坐标, 但当数据点处于区域 IV 时, 由于数据点超过了横、纵 2 个坐标轴的最大值, 因此无法以修正单个数据为目标使潮流重新收敛。

2.2.2 以修正数据总量最小为目标

修正数据总量最小即数据点到收敛边界的距离最短, 如图 3 所示。当以修正数据总量最小为目标时, 过数据点做数据点到收敛边界的垂线, 交边界于点 A, 则数据点与交点之间连线 \overline{MA} 的长度即为数据点到收敛边界的最短距离, 将 \overline{MA} 分解为横、纵 2 个分量, 横分量 \overline{Mo} 的长度为 P_i 的修正量, 纵分量 \overline{oA} 的长度为 P_j 的修正量。

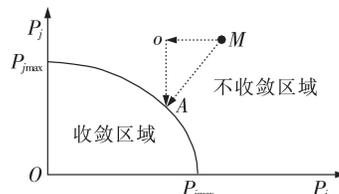


图 3 以修正数据总量最小为目标时的数据修正方案

Fig.3 Data correction scheme with goal of minimizing amount of corrected data

以修正数据总量最小为目标在理论上总能找到一个边界点坐标使得潮流计算收敛, 但在实际操作过程中, 数据点到收敛边界距离最短的点的坐标不易求取。

3 分析过程

本文所提方法的流程图如图 4 所示, 具体步骤如下。

(1) 将所搭建的模型和数据注入仿真软件中进行计算, 取迭代过程中控制变量的修正量最小的一次迭代, 此时的计算值最接近于注入数据, 对比该次

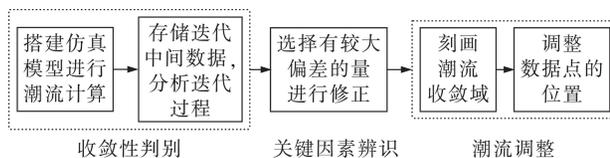


图 4 所提方法的流程

Fig.4 Flowchart of proposed method

迭代中 ΔP 、 ΔQ 峰值的大小,若 ΔP 的峰值较大,说明此时该系统的有功数据存在问题;反之,则说明此时的无功数据存在问题。

(2)单独观察该次迭代过程中,计算值与注入值之间存在较大偏差的变量,这些较大的偏差量说明在计算值最接近于注入数据时,这些变量仍然难以收敛,从而辨识得到了导致潮流不收敛的关键节点的问题数据。

(3)根据辨识得到的相应关键节点的功率为坐标轴,遍历节点功率,探寻收敛域边界。

(4)根据当前数据点与收敛边界的相对位置,选择相应的调整目标,将数据点拉回到收敛域之内,从而将不收敛的潮流调至收敛。

4 算例分析

仿真工具采用基于MATLAB的电力系统分析软件包PSAT(Power System Analysis Toolbox)。该软件包的源代码完全公开,通过修改源代码使之能够输出潮流迭代的中间数据。

4.1 某省220 kV及以上电压等级电网算例

采用我国某省220 kV及以上电压等级电网的仿真模型,该电网共有177个节点(17个500 kV电压等级节点,126个220 kV电压等级节点,34个变压器中间节点)以及301条输电线路和变压器绕组支路。将全网负荷扩大3倍使潮流仿真计算不收敛,用以验证本文所提方法的有效性。

利用牛顿法进行求解,潮流迭代20次后仍未收敛,首先观察利用牛顿法进行计算时各个修正量在各次迭代过程中的变化情况,计算结果见附录中图A1。由附录中图A1可直观地看出,随着潮流逐次迭代进行,在经过4次迭代后,其较大值逐渐集中在节点15邻近的几个节点内,且其他节点的修正量明显较小,而 Δx 在各次迭代中并未体现出明显的突变特征,且 Δx 作为间接量需借助雅可比矩阵计算 Δy ,并通过 Δy 与注入数据建立关系,由此说明根据 Δy 判别导致潮流计算不收敛关键因素的方法具备一定的优势。

各次迭代下的 E_{\max} 见表1。由表可见,第9次迭代时 E_{\max} 最小,此时的 E_{\max} 表示节点15有功功率修正量 ΔP_{15} ,说明当该次潮流迭代的计算量最接近注入数据时,节点15有功功率修正量最大。第9次迭代时各节点有功功率修正量如图5所示(图中 ΔP 为标幺值)。修正量数值由大到小排列的前3位分别为 ΔP_{15} 、 ΔP_{12} 、 ΔP_{10} ,且修正量偏差较大的几个节点在拓扑连接上构成了环网,环网中节点15的有功负荷较重,对该环网的潮流造成了恶劣的影响。

以第9次迭代时有功功率修正量最大的2个节点刻画潮流收敛域,如图6所示(图中 P_{12} 、 P_{15} 为标幺

表1 各次迭代下的 E_{\max}
Table 1 E_{\max} under each iteration

迭代次数	E_{\max}	节点	有功或无功修正量	迭代次数	E_{\max}	节点	有功或无功修正量
1	221.0	123	ΔQ	11	2.778	15	ΔP
2	19.40	9	ΔQ	12	0.641	15	ΔP
3	3.775	15	ΔQ	13	0.166	15	ΔP
4	1.676	15	ΔP	14	0.070	15	ΔP
5	0.634	15	ΔP	15	0.734	15	ΔP
6	0.203	15	ΔP	16	0.200	15	ΔP
7	0.078	15	ΔP	17	0.077	15	ΔP
8	0.132	15	ΔP	18	0.146	15	ΔP
9	0.068	15	ΔP	19	0.069	15	ΔP
10	12.07	15	ΔP	20	4.482	15	ΔP

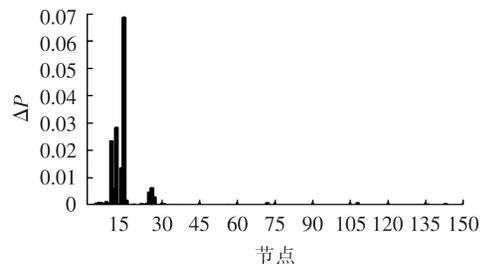


图5 第9次迭代时各节点有功功率修正量

Fig.5 ΔP of each node in 9th iteration

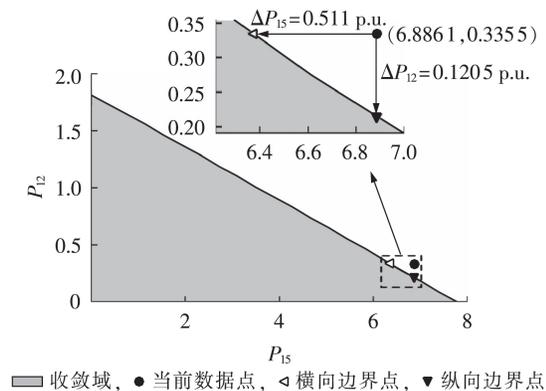


图6 P_{15} - P_{12} 收敛域

Fig.6 Convergence domain of P_{15} - P_{12}

值)。当前数据点的位置尚未越过收敛域横、纵轴的最大值,即位于图2所示的区域I之内。若选择修改单个数据对当前潮流进行调整,则 ΔP_{15} 最小调整量为0.511 p.u., ΔP_{12} 最小调整量为0.1205 p.u.,节点12的调整量较小,因此选择节点12的有功进行调整,调整量为0.1205 p.u.。

经过潮流数据修正,重新进行潮流计算。调整后潮流计算经过12次迭代达到收敛,调整前、后的迭代误差(标幺值)如表2所示。

4.2 欧洲电网13659节点系统算例

该算例采用欧洲电网13659节点系统,其包含13659个节点、20467条输电线路(或连接变压器),系统主网架有750、400、380、330、220、154、150、120、110 kV这9个电压等级,并有400~27000 V低

表2 潮流调整前、后各次迭代误差

Table 2 Error of each iteration before and after power flow adjustment

迭代次数	迭代误差		迭代次数	迭代误差	
	调整前	调整后		调整前	调整后
1	0.5963	0.5959	11	0.0766	0.0001
2	0.3400	0.3389	12	0.0481	0
3	0.1611	0.1588	13	0.1514	—
4	0.0806	0.0758	14	0.0773	—
5	0.0492	0.0384	15	0.0487	—
6	0.0651	0.0195	16	0.0686	—
7	0.0474	0.0098	17	0.0476	—
8	0.6821	0.0048	18	0.3657	—
9	0.3988	0.0022	19	0.1742	—
10	0.1496	0.0007	20	0.0963	—

压母线通过升压变压器连接至高压网络。设置PV节点4091个,PQ节点9567个,并将节点1设置为平衡节点。为了模拟实际系统中量测装置不够精确导致的微小数据误差,将所有负荷节点的功率设置为 $[0,0.005]$ p.u.范围内连续均匀分布的随机噪声,而噪声总量则由系统内所有发电机按原发电比例分摊。

经过潮流迭代8次后计算失败,潮流无法收敛,观察本文设置的指标 E_{\max} ,最小值出现在第6次迭代时的节点3876。观察节点3876在电网中的位置可知,平衡节点经升压变压器与节点3876相连接,且与其他节点相连。另外,节点3876有20条出线,与电网耦合十分紧密,且该节点自身负荷较重(3.4960 p.u.),与之直接相连的节点7492和节点437的有功负荷分别达到了5.7230、3.4470 p.u.。综合上述因素可见,节点3876的自身负荷情况及其在全网中所处的特殊位置,使得该节点严重影响了网络潮流计算的收敛特性,通过取消节点3876设置的随机噪声,并适当调节该节点与平衡节点间变压器的分接头,升高平衡节点电压,达到一定的无功支撑作用,重新利用牛顿法进行潮流计算,此时潮流迭代8次,第8次迭代计算的最大误差为 1.2864×10^{-6} p.u.,满足收敛条件,潮流重新收敛。

5 结论

本文提出了一种导致潮流计算不收敛的关键数据判别方法,该方法基于牛顿法潮流迭代中间数据的变化特征,建立潮流计算收敛性的判别指标,从而直接定位导致潮流计算不收敛的关键输入数据,为潮流调整提供了直接依据。另外,借助域的思想,定义潮流收敛域,通过对比当前数据点到收敛域边界的相对位置,对病态潮流进行相应目标下的数据修正,使得潮流计算得以重新收敛。本文所提方法强调注入数据对潮流收敛性的影响评估,克服了潮流不收敛时难以辨识主导影响节点的问题。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张道天,严正,徐潇源,等. 采用隐式Cholesky分解的大规模病态潮流计算[J]. 电网技术,2016,40(4):1197-1203.
ZHANG Daotian, YAN Zheng, XU Xiaoyuan, et al. Large-scale ill-conditioned power flow calculation using implicit Cholesky factorization method[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1197-1203.
- [2] OVERBYE T J. A power flow measure for unsolvable cases [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1359-1365.
- [3] 孙秋野,陈会敏,杨家农,等. 牛顿类潮流计算方法的收敛性分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(13):2196-2200.
SUN Qiuye, CHEN Huimin, YANG Jianong, et al. Analysis on convergence of Newton-like power flow algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2196-2200.
- [4] 杨雄,卫志农,孙国强,等. 含分布式电源的配电网三相解耦潮流计算方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):99-107,131.
YANG Xiong, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Decoupled three-phase power flow calculation for distribution network with DGs [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 99-107, 131.
- [5] 徐贤,李群,许扬,等. 无功优化算法收敛性讨论[J]. 电力自动化设备,2005,25(2):89-93.
XU Xian, LI Qun, XU Yang, et al. Discussion on convergence of reactive power optimization algorithms [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(2): 89-93.
- [6] PASSOS FILHO J A, MARTINS N, FALCAO D M. Identifying power flow control infeasibilities in large-scale power system models [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 86-95.
- [7] 李敏,陈金富,陈海焱,等. 一类潮流计算无解的实用性调整研究[J]. 电力系统自动化,2006,30(8):11-15.
LI Min, CHEN Jinfu, CHEN Haiyan, et al. Load flow regulation for unsolvable cases in a power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 11-15.
- [8] 彭慧敏,李峰,袁虎玲,等. 大规模电网运行方式调整潮流计算及病态诊断[J]. 电力系统自动化,2018,42(3):136-142,159.
PENG Huimin, LI Feng, YUAN Huling, et al. Power flow calculation and condition diagnosis for operation mode adjustment of large-scale power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 136-142, 159.
- [9] 彭慧敏,袁虎玲,鲍颜红,等. 大电网病态潮流的识别和修正方法[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(22):116-123.
PENG Huimin, YUAN Huling, BAO Yanhong, et al. Identification and correction method for ill-conditioned power flow of large scale network [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 116-123.
- [10] 李智欢,韩云飞,苏寅生,等. 基于节点类型转换的潮流收敛性调整方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(7):188-193.
LI Zhihuan, HAN Yunfei, SU Yinsheng, et al. A convergence adjustment method of power flow based on node type switching [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 188-193.
- [11] 王虹富,陶向红,李柏青,等. 基于虚拟中点功率的潮流估算模型[J]. 中国电机工程学报,2018,38(21):6305-6313,6492.
WANG Hongfu, TAO Xianghong, LI Baiqing, et al. An approximate power flow model based on virtual midpoint power [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(21): 6305-6313, 6492.
- [12] 郭靖,陈青,张卫星. 电力系统无功优化的原对偶内点算法及其应用[J]. 电力自动化设备,2004,24(5):41-43.
GUO Jing, CHEN Qing, ZHANG Weixing. Primal-dual interior

- point algorithm for reactive power optimization [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(5): 41-43.
- [13] 王晶, 骆旭伟, 陈骏宇, 等. 含微电网中压系统的PQ-同伦全局潮流计算方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 15-20.
WANG Jing, LUO Xuwei, CHEN Junyu, et al. PQ-homotopy method for calculating global power flow of MV system with microgrids[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 15-20.
- [14] 陈谦, 刘俊勇, 吴国梁. 含最优乘子的连续潮流算法和奇异值算法的电压静态稳定分析软件开发[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(4): 32-35, 39.
CHEN Qian, LIU Junyong, WU Guoliang. Development of power system voltage stability analysis software using continuation method and singular value decomposition method [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(4): 32-35, 39.
- [15] 严正, 范翔, 赵文恺, 等. 自适应Levenberg-Marquardt方法提高潮流计算收敛性[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 1909-1918.
YAN Zheng, FAN Xiang, ZHAO Wenkai, et al. Improving the convergence of power flow calculation by a self-adaptive Levenberg-Marquardt method[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1909-1918.
- [16] 曹佳, 徐潇源, 严正, 等. 几种高阶收敛的Levenberg-Marquardt方法在潮流计算中的应用[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1181-1187.
CAO Jia, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Application of several Levenberg-Marquardt methods with higher-order convergence in power flow calculation[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1181-1187.

作者简介:



安 军

安 军(1978—),男,安徽马鞍山人,教授,博士,主要研究方向为电力系统动态分析与控制(E-mail: anhujianjun@163.com);

宋俊达(1993—),男,吉林长春人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统潮流分析(E-mail: songjunda0163@163.com);

葛维春(1961—),男,辽宁铁岭人,教授级高级工程师,主要研究方向为电力系统分析(E-mail: gwc@ln.sgcc.com.cn)。

(编辑 陆丹)

Convergence identification and adjustment method of power flow calculation for large-scale power system

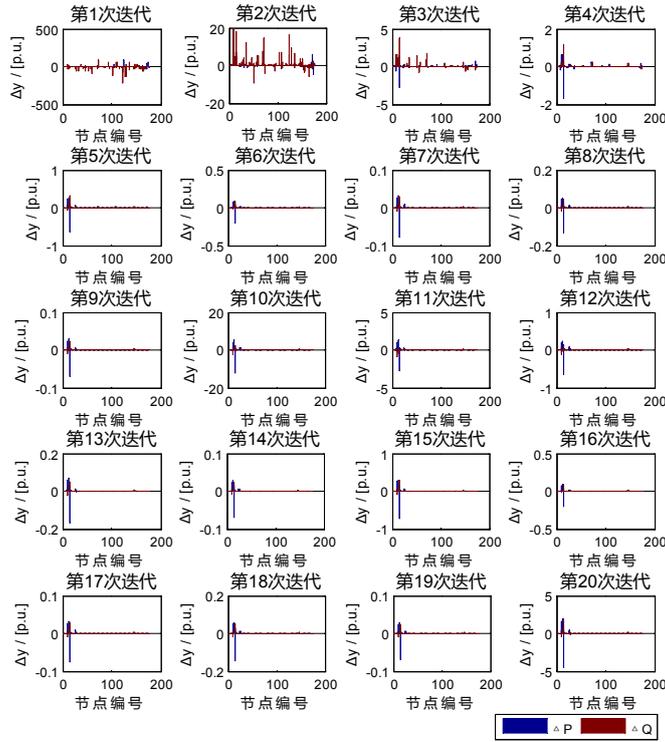
AN Jun¹, SONG Junda¹, GE Weichun²

- (1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;
2. State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., Shenyang 110006, China)

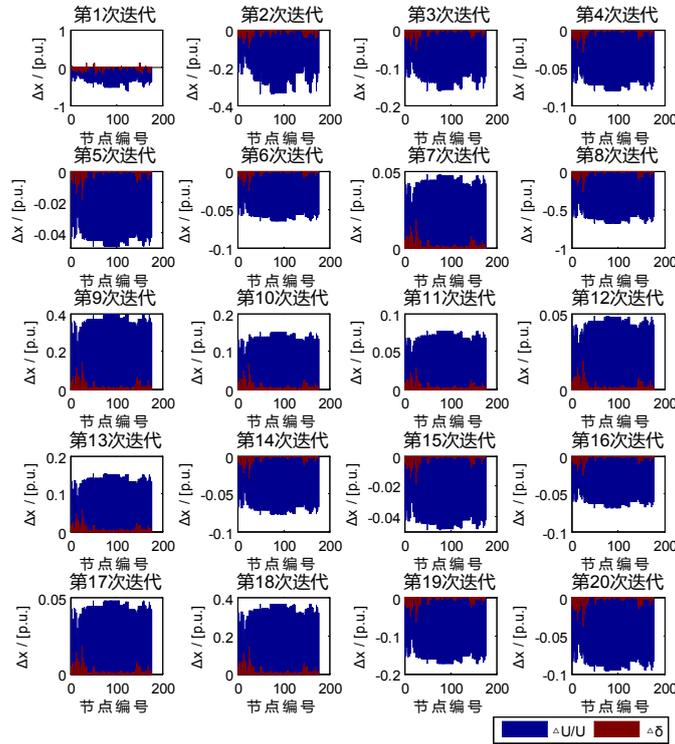
Abstract: In power flow simulation for large-scale power grid, the calculation is not easy to converge. Aiming at the difficulty of locating the key influence factors when the power flow calculation is not convergent, the indexes to judge the convergence of power flow calculation are established by analyzing the change rule of iterative intermediate data. An identification method of key factors that lead to non-convergence of power flow calculation is proposed, and the identified key factors are modified based on the convergence domain of power flow, which can provide intuitive reference for operators to adjust power flow. The effectiveness of the proposed method is verified by the simulation calculation of a province power grid with 220 kV and above voltage level and a 13659-bus system in Europe.

Key words: large-scale electric power systems; power flow calculation; convergence; iterative intermediate information; convergence domain of power flow

附录



(a) Δy 的变化情况



(b) Δx 的变化情况

图 A1 各修正量在迭代中变化的情况

Fig.A1 Variation of each correction in an iteration