

DOI: 10.7667/PSPC171569

大电网病态潮流的识别和修正方法

彭慧敏, 袁虎玲, 鲍颜红, 李峰

(南瑞集团有限公司/国网电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 为指导潮流计算人员解决病态潮流的识别和修正, 综述了大电网病态潮流的识别和修正方法。从数据的合理性、NR 迭代初值给定、直流迭代、节点类型转换、迭代步长和不平衡量分摊策略, 详细分析了影响潮流收敛性的六类因素, 归纳了四类病态潮流的识别要素和指标, 以及两类病态潮流修正方法。提出必须针对病态潮流收敛性的制约因素, 依据不同病态特征确定调整措施、调整区间和调整方向, 采用相应的修正方法。分析研究和算例验证表明, 基于 NR 迭代信息的电压衰减比指标法, 能够自动识别病态潮流及其制约因素和合适的调整区间和措施, 通过优化调整实现病态潮流修正。

关键词: 病态潮流; 影响因素; 收敛性指标; 识别; 自动修正

Identification and correction method for ill-conditioned power flow of large scale network

PENG Huimin, YUAN Huling, BAO Yanhong, LI Feng

(NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: In order to guide the power flow calculation staff to identify and correct the ill-conditioned power flow, this paper summarizes the identification and correction methods of ill-conditioned power flow in the large scale power grid. It analyses in detail six types of factors which affect the power flow convergence from the data rationality, the NR iteration initial value, and the strategies of DC iteration, node type conversion, and iteration step and unbalance allocation, summarizes four kinds of ill-conditioned power flow identification elements and indicators, and proposes two kinds of ill-conditioned power flow correction methods. The correction of ill-conditioned power flow must adopt the corresponding correction methods according to different ill-conditioned characteristics and the restriction factors for the convergence to determine the appropriate adjustment range and measures. Numerical results and analysis show that the voltage attenuation index using the NR iterative information can automatically identify the ill-conditioned, restrictive factors and appropriate adjustment range and measures to optimize implementation of ill-conditioned power flow correction.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Study of Diagnosis Method for Large Power Network Simulation Convergence Performance".

Key words: ill-conditioned power flow; influencing factors; convergence index; identification; automatic correction

0 引言

大规模的交直流混联网络进行潮流计算时, 调度运行和方式计算人员经常面临方式变化和调整引起的潮流病态及收敛性问题, 迫切需要病态潮流修正的指导方法。

当潮流功率分布不合理、元件参数数据不合理,

可能导致牛顿—拉夫逊迭代的雅可比矩阵条件数过大, 甚至恶化潮流收敛性, 表现明显的病态特征。产生病态潮流, 一方面是算法本身迭代过程出现病态, 另一方面是潮流方式本身存在部分线路或断面潮流过重。潮流求解病态主要表现为: 潮流收敛依赖于迭代搜索路径和计算参数设置, 潮流收敛解严重偏离启动初值, 获取潮流收敛解的迭代次数增加而收敛速度慢。

对于电网中出现重负荷系统、线路电阻与电抗的比值(r/x)较大、小支路、变压器变比不合理等问

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助“大电网仿真收敛性能诊断方法研究”

题^[1-5]导致牛拉法迭代中雅可比矩阵条件数过大时, 通常采用预处理技术降低雅可比矩阵条件数改善收敛性。

对于系统有功不平衡, 平衡机出力越限, 部分断面功率过大, 超出其静稳极限, 或者系统无功不平衡, 无功支撑不足导致部分区域电压过低, 通常采用最优乘法^[6-8]、自适应的列文伯格—马夸尔特(LM)方法^[9]等, 改变迭代步长或迭代方向, 避免直接临近电压不稳定点提高收敛性。

当以上方法均不能保障潮流收敛时, 则需要选择合适的调整区域和调整方向, 对潮流方式数据作一定修正从而使潮流收敛。

目前国内外研究大多专注于潮流算法收敛性的改进。文献[10]针对牛顿类潮流计算的初值敏感性问题, 提出牛顿类潮流计算的收敛性定理。文献[11-13]针对牛顿法潮流计算的初值敏感问题, 考虑了两种含小阻抗支路的病态系统和重负荷病态系统对潮流收敛性的影响。文献[13]提出了最优乘子的牛顿法潮流计算方法, 但最优乘法仍然存在对初值敏感的问题。对于病态潮流的求解和自动调整, 大量文献局限于理论上研究^[14-18], 大多回避了病态潮流的影响因素、病态原因, 直接将病态潮流的修正问题转化为最小调整量或最小调整代价的优化问题。

在潮流收敛性和自动调整工程实用方面, 文献[14]通过分析功率不平衡引起不收敛的机理, 提出基于节点无功缺额指标搜索无功不足节点。文献[19]基于NR迭代电压幅值和相角偏差衰减比指标, 提出了一套工程实用的方式调整潮流计算方法。

本文针对病态潮流的识别和修正问题, 归纳分析了影响潮流收敛性能的主要因素, 已有的潮流计算方法、病态潮流的识别和收敛性指标。在此基础上, 基于各类病态潮流的识别方法和指标, 探讨了病态潮流的修正方法。研究表明, 必须针对病态潮流收敛性的制约因素, 选择合适的调整区间和措施, 采用相应的修正方法。

1 影响PQ&N-R潮流收敛的主要因素

1.1 支路参数和系统功率平衡的合理性

小阻抗支路、高R/X比支路、变压器异常变比和系统有功出力与负荷平衡的不合理等都会影响潮流计算的收敛性^[1-5]。

(1) 变压器变比

变压器变比不合理主要表现在变压器变比偏离额定值过多, 容易引起部分节点电压过高或者过低。

(2) 线路参数

通常交流输电网线路电抗远大于电阻, 而配电网线路或短距离的输电电缆, 通常存在高R/X比支路。高R/X比支路的存在使得PQ分解法应用的假设不成立, 影响其收敛性。

(3) 小开关支路电阻电抗不合理

潮流数据中经常存在小开关支路, 其阻抗数值一般为0.000 1~0.000 4 p.u.。数值过小, 将使得雅可比矩阵出现较大元素, 严重影响潮流收敛。

(4) 发电出力与负荷不平衡

潮流计算一般指定一台机组作为平衡机, 以平衡发电出力与负荷间的平衡。当发电出力与负荷严重不平衡时, 平衡机送出支路上超出实际发电容量范围的未安排功率将产生较大的电压降落, 容易引起潮流不收敛。

1.2 NR迭代计算初值给定

(1) 固定PQ分解法迭代次数

通常牛顿—拉夫逊(NR)潮流法迭代计算初值采用PQ分解法平启动($V_i^{(0)} = 1.0 \angle 0$)经式(1)迭代求解, 直至满足给定的固定PQ分解法迭代次数, 将迭代中功率偏差之和最小的解作为NR迭代初值。

$$\begin{cases} \Delta P = H \Delta \theta \\ \Delta Q = L \Delta U / U \end{cases} \quad (1)$$

由于PQ分解法忽略了有功和无功间的耦合, 在重负荷方式以及无功分布不合理的方式下, 采用固定PQ分解法迭代次数获取NR迭代初值, 仍存在潮流收敛问题。为消除迭代路径对潮流收敛的影响, 大型实用潮流程序采用了变PQ分解法迭代次数策略, 以获取更合适的NR迭代初值。

(2) 变PQ分解法迭代次数策略

首先, 采用固定PQ分解法迭代次数, 获取NR迭代初值, 进行NR潮流迭代。

若第一轮NR迭代达到最大NR迭代次数潮流不收敛, 则采用变PQ分解法迭代次数策略。设固定PQ分解法迭代次数为T(如设为15), NR迭代最大次数为N(如设为30), 则变PQ分解法迭代次数策略如下所述。

第k轮NR迭代, 采用PQ分解法获取NR迭代初值, PQ分解法迭代次数为 $T + (k-1) \times \Delta T$ 。若 $T + (k-1) \times \Delta T$ 超过N则取N。

若 $T + (k-1) \times \Delta T$ 达N后仍不收敛, 则按每轮减小 ΔT 的策略逐轮减小PQ迭代次数, 直至潮流收敛, 或者达到PQ迭代次数为0, 潮流不收敛结束。

很明显, 通过逐轮增加/减小PQ迭代次数, 枚举式变更PQ分解法迭代次数获取NR迭代初值, 可以部分解决NR迭代依赖初值的选择问题, 改善

潮流收敛性。但该策略忽视了各轮 NR 迭代中的最好解。

(3) 变 PQ 分解法迭代次数策略和上轮 NR 迭代最好解加权的潮流初值给定方法

变 PQ 分解法迭代次数策略, 仅仅是采用不同的 PQ 分解法迭代次数, 试探获取 NR 初值, 并没有考虑有功和无功的耦合关系对潮流解的影响。当潮流初值不在 NR 迭代收敛域内时, NR 迭代无法得到满足收敛的解。

设第 k 轮 NR 迭代的最好解记为 $V^{(k,n)}$, 第 $k+1$ 轮 NR 迭代采用变 PQ 分解法迭代次数策略获取的 NR 初值为 $V^{(k+1,0)}$, 则取 $V = \alpha V^{(k+1,0)} + \beta V^{(k,n)}$ 作为第 $k+1$ 轮 NR 迭代初值, 其中 $\alpha + \beta = 1$ 。

权系数 α 和 β 的取值如下:

若第 k 轮 NR 迭代功率偏差小于一定门槛值时, 取 $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$ 。否则, 取 $\alpha = 1.0$, $\beta = 0$ 。

由于本轮 PQ+NR 迭代时, 计及了上轮 NR 迭代中的最优解 $V^{(k,n)}$, 可以弥补 PQ 分解时的有功和无功的交互影响, 给出更加合理的 NR 迭代潮流初值。

1.3 NR 迭代中直流系统迭代更新策略

目前交直流电力系统潮流计算基本上分为两大类: 联合求解法和交替求解法。前者建立交直流联立方程组统一求解交流和直流系统状态量。而后者将交直流系统的方程组分别求解。目前大型实用分析软件均采用交替求解法, 本文 NR 迭代直流系统迭代策略, 仅限于交替求解方法。

交替求解法时, 已知由交流系统潮流求解计算得到换流站的交流母线电压 $V_{i,r}$, 直流系统等值负荷为

$$\begin{aligned} P_i &= \frac{3N_r V_{i,r} I_d \sqrt{2}}{\pi} \cos \alpha - \frac{3X_{cr} I_d^2}{\pi} \\ Q_i &= \left(\frac{3N_r V_{i,r} I_d \sqrt{2}}{\pi} \cos \alpha - \frac{3X_{cr} I_d^2}{\pi} \right) \times \tan \varphi_{i,r} \end{aligned} \quad (2)$$

给定直流传输功率和直流电压, 以及控制角 α , 随着 $V_{i,r}$ 的迭代变化, 需确定 N_r 和 $\varphi_{i,r}$ 。当出现某换流变压器的变比 N_r 超过其上下调节范围, 则取 N_r 等于 N_r^{\max} 或 N_r 等于 N_r^{\min} 。此时, 随着 $V_{i,r}$ 的迭代变化, 直流系统的控制角需相应调整变化, 对应直流系统所吸收的无功明显变化。

以第 m 次 NR 迭代 $N_r = N_r^{\max}$ 越上限为例, 设第 $m-1$ 次 NR 交替求解时的控制角为 $\alpha^{(m-1)}$ 。若交流求解的 $V_{i,r}^{(m)}$ 增加, 则依据 $V_{i,r}^{(m)}$ 求解直流部分的控制角增大, 由式(2)计算得控制角为 $\alpha^{(m,j)}$ 。

通常 NR 迭代中直流系统迭代更新策略: 直接取 $\alpha^{(m)} = \alpha^{(m,j)}$ 作为下一次 NR 交替求解时的控制角。此时交直流 NR 迭代中较小的 $V_{i,r}$ 的迭代变化, 将引起控制角和直流系统吸收无功较大变化, 不利于 NR 迭代收敛, 在无支撑紧张时, 甚至出现潮流收敛性问题。

若采用如下策略(权系数满足 $\sigma + \zeta = 1.0$)

$$\alpha^{(m)} = \sigma \times \alpha^{(m-1)} + \zeta \times \alpha^{(m,j)} \quad (3)$$

即: 将第 $m-1$ 次 NR 交替求解时的控制角 $\alpha^{(m-1)}$ 与本次直接由交流电压 $V_{i,r}^{(m)}$ 计算所得控制角 $\alpha^{(m,j)}$ 加权, 作为第 m 次 NR 迭代计算直流等值功率的控制角。由于采用加权方式, 使得直流系统吸收无功功率平缓增加, 有利于 NR 迭代收敛, 在无支撑紧张时, 可以明显改善潮流收敛性。

1.4 NR 迭代中 PV/PQ 节点类型转换策略

潮流计算中部分节点的 PV-PQ 类型转换可以模拟系统中无功注入设备对系统电压的控制有效性。当一个电压控制节点由 PV 型转变为 PQ 型, 表明一个无功注入源的无功已达到限制值, 无法继续提供上调或下调无功支撑维持电压的能力。PV-PQ 类型转换逻辑的正确性在潮流计算中起着关键的作用。

文献[20]详细研究了潮流计算中的 PV-PQ 节点转换逻辑, 并引入阻尼因子 α ($0 < \alpha \leq 1$) 来减小数值振荡:

$$V_i^{k+1} = V_i^k + \alpha (V_i^{\text{set}} - V_i^k) \quad (4)$$

1.5 PQ&NR 迭代步长更新策略

(1) PQ 分解法相角更新策略

对于 PQ 分解法迭代, 隐含要求功角变化不大, 即 $\sin \Delta \theta \approx \Delta \theta$, 否则有功和无功解耦条件不满足。因此在实际 PQ 分解法迭代中, 大多程序引入了修正量限制, 以避免前后两次迭代相角修正超过 45° 。本文进一步在迭代中引入了以下迭代步长更新策略。

$$\begin{cases} \theta^{(k+1)} = \begin{cases} \theta^{(k)} + \Delta \theta^{(k)}, \max_i (|\Delta \theta_i^{(k)}|) < \frac{\pi}{4} \\ \theta^{(k)} + \lambda \times \Delta \theta^{(k)}, \max_i (|\Delta \theta_i^{(k)}|) \geq \frac{\pi}{4}, \lambda < 1 \end{cases} \\ U^{(k+1)} = U^{(k)} + \Delta U^{(k)} \end{cases} \quad (5)$$

即: 若相角迭代中, 修正量 $\Delta \theta^{(k)}$ 的绝对值最大元素小于 $\frac{\pi}{4}$ 弧度(或 45°), 则将前一次迭代求得的修正量直接与前一次的解向量求和, 作为本次的解向量。

否则将修正量 $\Delta\theta^{(k)}$ 乘上一个小于 1 的常数 λ , 再与前一次的解向量求和, 作为本次的解向量。

采用以上 PQ 分解法相角更新策略, 可以防止迭代初始修正量 $\Delta\theta^{(k)}$ 修正过大, 因 $\sin\Delta\theta$ 在 $[0, \frac{\pi}{2}]$ 单调上升而在 $[\frac{\pi}{2}, \pi]$ 单调下降, 使得前后两次迭代出现在单调性不同的区内迭代, 避免节点电压相角差快速增大收敛性变差, 尤其是在存在指定多个缓冲机时明显有助于潮流收敛。

(2) 最优乘子牛顿法确定 NR 迭代步长^[6]

采用最优乘子牛顿法适时改变了修正步长, 在潮流不收敛时, 可以收敛至最小二乘解。

设潮流方程组 $f(x)=0$, 在牛顿法迭代的第 i 步修正量 $\Delta x^{(i)}$, 最优乘子潮流方法在每步迭代时以 $\mu^{(i)}\Delta x^{(i)}$ 作为修正量, 而第 i 步的最优乘子 $\mu^{(i)}$ 可通过求解式(6)的优化问题确定。

$$\mu^{(i)} = \arg \min_{\mu} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n f_i^2(x^{(i)} + \mu\Delta x^{(i)}) \quad (6)$$

1.6 NR 迭代过程中不平衡量的分摊策略

潮流计算仅指定一台机组作为平衡机, 在实际大电网潮流计算时, 经常难以平衡系统网损, 导致平衡机仍存在较大的未安排平衡, 在平衡机送出支路上出现较大电压降落, 容易引起不收敛。

文献[19]给出的 NR 迭代中选择若干候选机组模拟多平衡机分摊方法, 可以在指定单一平衡机无法满足平衡网损要求时, 在 NR 迭代过程中自动模拟候选平衡机组与指定的单一平衡机组共同分摊网损, 实现平衡机出力越限调整, 获取合理的潮流结果。即在 NR 迭代过程中, 依据迭代的节点电压按式(7)计算平衡机出力 $P_{Gs}^{(k)}$ 。

$$P_{Gs}^{(k)} = P_{Ds}^{(k)} + \sum_{j \in s} V_j^{(k)} Y_{sj} V_s \cos \delta_{sj} \quad (7)$$

在每次 NR 迭代中, 将平衡机偏离当前出力部分 $P_{Gs}^{(k)} - P_{Gs0}$ 在平衡机 s 和所有候选平衡机间按可调空间或容量大小平均分摊。

2 病态潮流的识别和修正

2.1 病态潮流的识别

表 1 汇总比较了目前主要用于识别病态潮流的四类指标。

文献[19]由 NR 潮流迭代中电压修正量 $[\Delta x]^{(k)}$ 幅值和相角最大元素的绝对值(分别记为 $|\Delta U^{(k)}|$ 和 $|\Delta\delta^{(k)}|$) 定义迭代衰减比指标 $\frac{|\Delta U^{(k)}|}{|\Delta U^{(k-1)}|}$ 和 $\frac{|\Delta\delta^{(k)}|}{|\Delta\delta^{(k-1)}|}$,

自动识别病态潮流。在 NR 迭代过程中衰减比均无法衰减趋近于 0, 则自动识别潮流求解表现病态, 无法正常收敛。当识别潮流求解病态时, 指标突变点处电压幅值和相角迭代衰减比指标的大小可以确定病态特征。若电压幅值衰减指标大于相角衰减指标, 则潮流病态特征表现为局部无功支撑不足, 选择 $\Delta U^{(k)}$ 数值较大的无功可调整节点作为合适的调节点。反之, 则为断面潮流过重, 选择 $\Delta\delta^{(k)}$ 数值较大的有功。通常可调整节点作为合适的调节点。

带最优乘子 NR 法^[6-8], 在迭代中以最优乘子乘以牛顿方向进行修正, 从而避免对电压向量产生过修正或欠修正。通过检测带最优乘子 $\mu^{(i)}$ 的 NR 法目标函数 $\sum_{i=1}^n f_i^2(x^{(i)} + \mu\Delta x^{(i)})$ 是否等于 0 判断潮流收敛, 其数值大小反映了潮流病态程度。

采用等比降功率潮流法^[12], 保持负荷的功率因数不变, 将系统的负荷水平和发电机的出力同时下降到某一负荷系数, 获取临界收敛的负荷系数 k_{cir} 。 k_{cir} 指标 ($k_{cir} < 1$) 反映了初始潮流方式的收敛性能, k_{cir} 越小越难收敛。

针对电力系统无功功率不平衡导致的潮流计算不收敛问题, 文献[14]提出基于节点类型转换的潮流收敛性调整方法, 将系统全部 PQ 节点设置为 PV 节点, 按节点无功缺额指标逐步恢复节点为 PQ 节点。无功缺额指标最大的节点对应的无功缺额指标, 反映了潮流收敛的病态程度。

以上四类病态潮流识别方法, 除节点无功缺额指标法仅限于无功不平衡导致的潮流不收敛、临界收敛系数法需多次采用等比降功率潮流法试探确定 k_{cir} 外, 其他两类方法均可以在 NR 迭代中识别。衰减比法甚至可以比较准确地利用电压 $\Delta U^{(k)}$ 或相角 $\Delta\delta^{(k)}$ 信息, 选择较大的无功/有功可调整节点作为合适的调节点。

表 1 四类识别病态潮流指标的比较

Table 1 Comparison of four types for ill-conditioned power flow indices

病态潮流识别	识别指标	病态识别要素
电压衰减比	$\frac{ \Delta U^{(k)} }{ \Delta U^{(k-1)} }$ 和 $\frac{ \Delta\delta^{(k)} }{ \Delta\delta^{(k-1)} }$	衰减比无法收敛趋于 0; 突变点两者大小可确定病态特征, 据此可选择修正点
最优乘子	$\sum_{i=1}^n f_i^2(x^{(i)} + \mu\Delta x^{(i)})$	目标函数值不等于 0
临界收敛系数	临界收敛 k_{cir}	k_{cir} 小于 1; 需多次分析试探确定 k_{cir}
无功缺额	无功缺额 Q_{vea}	Q_{vea} 反映潮流病态程度 仅限无功不平衡

2.2 病态潮流的修正

(1) 基于非线性规划的病态潮流修正

将病态潮流的修正问题转化为非线性规划问题, 无需明确潮流病态的原因, 只需给定控制变量、约束条件等, 优化模型如式(8)所示。

$$\begin{cases} \min f = \sum_{i \in S_G} w_{PG} (P_{Gi} - P_{G0i})^2 + \sum_{i \in S_L} w_{PL} (P_{Li} - P_{L0i})^2 + \\ \sum_{i \in S_{QG}} w_{QG} (Q_{Gi} - Q_{G0i})^2 + \sum_{i \in S_{QL}} w_{QL} (Q_{Li} - Q_{L0i})^2 + \\ \sum_{i \in S_V} w_V (V_i - V_{0i})^2 + \sum_{i \in S_K} w_k (K_i - K_{0i})^2 \\ \text{s.t. } h(x) = 0 \\ \underline{g} \leq g(x) \leq \bar{g} \quad x \in R^n \end{cases} \quad (8)$$

式中: S_G 、 S_L 、 S_{QG} 、 S_{QL} 、 S_V 、 S_K 分别为可调有功发电节点集、可调有功负荷节点集、可调无功发电节点集、可调无功负荷节点集、可调节节点电压节点集、可调变比集; P_{Gi} 、 P_{Li} 、 Q_{Gi} 、 Q_{Li} 、 V_i 、 K_i 分别为待求可调发电有功、负荷有功、发电无功、负荷无功、可调节节点电压、可调变比; 而 P_{G0i} 、 P_{L0i} 、 Q_{G0i} 、 Q_{L0i} 、 V_{0i} 、 K_{0i} 分别为初始潮流方式中的对应值; w_{PG} 、 w_{PL} 、 w_{QG} 、 w_{QL} 、 w_V 、 w_k 分别为相应的权重。

引入松弛变量将不等式约束 $g(x)$ 转化为等式约束, 使用基于扰动 KKT 条件的原始对偶内点经典算法对目标函数进行求解。

纯粹数学上将病态修正转化为非线性规划问题, 难点在于可调节控制变量的选择。过大的可调节控制范围, 可能使得优化后的修正范围太大而无法应用于实际电网运行, 而过小则无法有效得到优化的可调结果。

文献[19]中提出的衰减比指标, 在潮流求解病态特征确定后, 依据不同特征选择调整区间和调整方向, 从而解决可调节控制变量的选择难题。

若为无功支撑不足: 选择电压幅值绝对值 $|\Delta U^{(k)}| \geq \varepsilon$ 的范围内所有无功可调节节点作为无功可调节节点。通常 $\Delta U^{(k)}$ 大于 0 的节点降无功, $\Delta U^{(k)}$ 小于 0 的节点增无功。

若为断面潮流过重: 选择电压相角绝对值 $|\Delta \delta^{(k)}| \geq \varepsilon$ 的范围内所有发电机机组(和含有功负荷的)节点作为有功可调节节点。通常 $\Delta \delta^{(k)}$ 大于 0 的节点降有功出力(增有功负荷), $\Delta \delta^{(k)}$ 小于 0 的节点增有功出力(降有功负荷)。

(2) 无功支撑不足的病态潮流修正

当潮流求解病态特征确定为无功支撑不足时, 可以选择合适的无功可调节节点, 适当调整无功分布, 使得潮流方式重新收敛。

目前主要有三种方法可以确定电压薄弱区: 电压模态分析法^[21]、电压幅值衰减比指标法、无功缺额指标法。

常用的电压模态分析是利用系统静态模型, 计算简化雅可比矩阵规定数目的最小特征值及其特征向量。每个特征值与电压/无功功率变化模式相关, 其大小提供了电压不稳定的相对量度。依据特征值最小模式下的特征向量选择参与因子较大的发电机和负荷节点, 调整可调节节点的无功和有功, 通过增加无功支撑, 提高潮流收敛性。

电压幅值衰减比指标法依据 NR 迭代中衰减比指标 $\frac{|\Delta U^{(k)}|}{|\Delta U^{(k-1)}|}$ 突变点处的电压幅值修正量, 选择

电压幅值绝对值 $|\Delta U^{(k)}| \geq \varepsilon$ 的范围内所有无功可调节节点作为无功可调节节点。通常 $\Delta \delta^{(k)}$ 大于 0 的节点降无功, $\Delta \delta^{(k)}$ 小于 0 的节点增无功。

通过电压模态分析法或者电压幅值衰减比指标法选择了无功可调节节点后, 即可按式(8)建立非线性规划的潮流修正模型, 优化求解各可调节节点的调节修正量。

无功缺额指标法通过优先安排指标值较小的节点恢复为 PQ 节点, 实现无功调整获取收敛解。首先, 将所有 PQ 节点都设置为 PV 节点, 系统潮流计算收敛。计算此时的节点无功缺额指标, 并按指标大小优先恢复无功缺额指标较小的节点类型。然后对恢复后的方式进行潮流计算, 计算节点无功缺额指标并进行排序, 如此重复直至潮流不收敛。最后在剩余未恢复的节点进行无功修正。

从无功缺额指标法修正过程可知, 该方法更似一个启发式的调整过程。

2.3 病态潮流识别和修正案例分析

以某区域在线系统日计划数据为例, 网络数据中交流节点数规模 2 959, 支路数 3 483。通过退出部分直流受端换流站无功补偿容量和部分调整出力和负荷, 得到引起潮流不收敛的方式一和方式二。分别计算其表 1 给出的四类潮流病态指标如表 2。

由表 2 可知: 方式一的电压幅值衰减比指标大于相角指标, 而方式二的电压相角衰减比指标大于幅值指标, 据此可确定方式一局部无功支撑不足, 方式二断面潮流过重。

因 NR 迭代各步有无功偏差之和数值略有波动, 表 2 中的最优乘子指标, 数值上取 NR 迭代各

步的均值。

采用等比降功率潮流法, 可以二分法试探获取临界收敛系数, 经详细的专业分析可以定位病态潮流原因。采用节点无功缺额指标法针对方式一可以确定某换流站节点无功缺额最大, 达 711 Mvar, 而对方式二无效。同时, 两者均需多次试探, 使用不方便, 且收敛原因需经专业人员分析确定。

表 2 四类识别病态潮流指标实例

Table 2 Comparison of four types for ill-conditioned power flow indices

识别法	方式一	方式二
电压衰减比指标	幅值 12.821	幅值 1.817
	相角 1.944	相角 2.172
最优乘子指标	9.149	28.269
临界收敛系数指标	0.99	0.98
无功缺额	711 Mvar	—

电压衰减比指标法同最优乘子指标法, 一次 NR 迭代可以获得指标信息, 并给出病态潮流的原因(局部无功支撑不足, 或部分断面潮流过重), 以及电压薄弱节点或者潮流过重断面所联接的区域。如方式一电压最薄弱点在云广直流逆变侧换流变压器母线邻近区, 方式二为“青岩-独山”单线断面潮流过重。图 1 分别给出了方式一和方式二 NR 迭代中的电压衰减比指标, 从衰减比指标曲线可知: 局部无功支撑不足时, 仅在 NR 前几次迭代波动较大, 后续波动一般在小范围内。而部分断面潮流过重时, 在整个 NR 迭代过程中, 衰减比指标出现多次大幅度波动变化, 且突变点电压相角均值大于幅值均值。

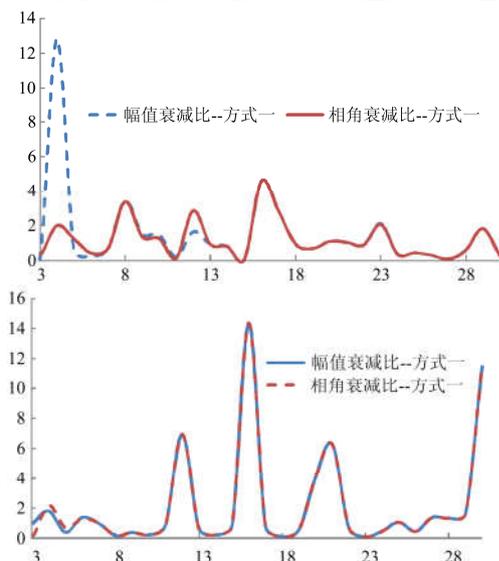


图 1 NR 迭代中病态潮流指标

Fig. 1 Indexes of ill-conditioned power flow in each NR iteration step

确定了病态潮流的原因, 以及电压薄弱或者潮流过重断面所联接的区域后, 则可以采用本文归纳的两类病态潮流修正方法, 有针对性地进行病态修正。

如对方式一, 可以采用基于非线性规划的病态潮流修正方法, 选择云广直流逆变侧换流变压器母线近区含无功出力或负荷的节点作为可调节节点, 以调整量最小为目标, 按式(8)构造数学优化模型。

对于无功支撑不足的病态潮流, 也可以采用无功缺额指标法, 人为试探修正。如表 2, 经试探, 在云广直流逆变侧换流变压器母线处并入 711 Mvar 无功, 潮流收敛。

对方式二, 经电压衰减比指标病态潮流识别后, 采用基于非线性规划的病态潮流修正方法, 选择贵州降出力广东增出力方式并辅以局部无功调整, 以降低“青岩-独山”单线断面潮流, 按式(8)构造数学优化模型, 优化结果如下: 贵州降出力 250 MW, 广东增出力 430 MW, 多余部分弥补线路传输网损的增加。

以上算例分析表明: 采用电压衰减比指标法, 能够准确定位病态潮流的原因, 并给出电压薄弱节点或者潮流过重断面所联接的大致区域。基于这些信息可以方便地构造非线性规划的病态潮流修正模型, 获取优化后的修正措施。

3 结论

本文针对病态潮流的识别和修正问题, 对影响潮流收敛性的数据合理性、NR 迭代初值给定、直流迭代、节点类型转换、迭代步长和不平衡量分摊策略六类因素进行详细分析。在此基础上, 归纳了四类病态潮流的识别要素和指标, 以及两类病态潮流修正方法。分析研究表明, 必须针对病态潮流收敛性的制约因素, 依据不同病态特征确定调整区间和调整方向, 选择合适的调整区间和措施, 采用相应的修正方法。

随着电力电子化设备和微电网的大量接入, 以及电力市场化的推进, 潮流收敛和调整问题仍需从算法和工程应用两方面进一步深入关注。

参考文献

- [1] 扈诗扬, 杨萌, 汪芳宗. 基于坐标旋转变换的配电系统快速解耦潮流计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 40-44.
- HU Shiyang, YANG Meng, WANG Fangzong. A fast decoupled load flow method for distribution system via coordinate rotation transformation[J]. Power System

- Protection and Control, 2017, 45(4): 40-44.
- [2] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2007: 111-150.
- [3] 殷自力, 陈宇星. 基于功率传输转移分布因子的简化电网潮流计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 25-30.
- YIN Zili, CHEN Yuxing. A power flow computation method for reduction grid based on power transfer distribution factor[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 25-30.
- [4] 范晓龙, 何健, 刘汇川, 等. 含多类型分布式电源的主动配电网三相潮流计算[J]. 陕西电力, 2016, 44(12): 11-17.
- FAN Xiaolong, HE Jian, LIU Huichuan, et al. Three-phase power flow computation for active distribution networks with different types of distribution generations[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(12): 11-17.
- [5] 李敏, 陈金富, 段献忠, 等. 潮流计算收敛性问题的研究综述[J]. 继电器, 2006, 34(4): 74-79.
- LI Min, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong, et al. A study of load flow calculation when power flow does not converge to a solution[J]. Relay, 2006, 34(4): 74-79.
- [6] 胡泽春, 严正. 带最优乘子牛顿法在交直流系统潮流计算中的应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 26-31.
- HU Zechun, YAN Zheng. Application of Newton load flow methods with optimal multiplier for AC/DC power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 26-31.
- [7] 刘俊, 郝旭东, 王旭, 等. 电力系统并行计算综述[J]. 智慧电力, 2017, 45(7): 112-120.
- LIU Jun, HAO Xudong, WANG Xu, et al. Review of parallel computing in power system[J]. Smart Power, 2017, 45(7): 112-120.
- [8] 王承民, 蒋传文, 侯志俭. 基于节点不平衡功率的病态潮流算法[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(8): 1283-1286.
- WANG Chengmin, JIANG Chuanwen, HOU Zhijian. The ill-conditioned load flow algorithm based on node lopsided powers[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2004, 38(8): 1283-1286.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 姚玉斌, 鲁宝春, 陈学允. 小阻抗支路对牛顿法潮流的影响及其处理方法[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 27-31.
- YAO Yubin, LU Baochun, CHEN Xueyun. A method to deal with the effect of small impedance branches to prevent divergence in Newton Raphson load flow[J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 27-31.
- [12] 李智欢, 朱乔木, 苏寅生, 等. 几种提高牛顿法潮流收敛性的初值给定方法研究[J]. 电工电气, 2015(10): 1-6.
- LI Zhihuan, ZHU Qiaomu, SU Yinsheng, et al. Research on several initial value methods of improved Newton-Raphson power flow convergence[J]. Electrical & Electronics, 2015(10): 1-6.
- [13] IWAMOTO S, TAMURA Y. A load flow calculation method for ill-conditioned power systems[J]. IEEE Transactions on PAS, 1981, 100(4): 1736-1743.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 王宪荣, 包丽明, 柳焯. 极坐标系准最优乘子病态潮流解法研究[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14(1): 40-45.
- WANG Xianrong, BAO Liming, LIU Zhuo. The study of ill-conditioned load flow using quasi-optimal factor in polar coordinates[J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 14(1): 40-45.
- [17] 张国芳, 罗雅迪, 李静, 等. 大电网潮流修正方程并行求解实现方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19):

- 117-122.
ZHANG Guofang, LUO Yadi, LI Jing, et al. Parallel solution method of power flow correction equation for large-scale power grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 117-122.
- [18] 张跃驰, 刘本希, 罗彬, 等. 基于 PSD-BPA 的电网运行方式数据自动整合与调整方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 102-108.
ZHANG Yuechi, LIU Benxi, LUO Bin, et al. PSD-BPA based automatic integration and adjustment method of power grid operation plan data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 102-108.
- [19] 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. Operations modes adjustment Power flow calculation and ill-conditioned diagnosis of large scale power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 136-142, 159.
- [20] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 潮流计算中 PV-PQ 节点转换逻辑的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 54-59.
ZHAO Jinquan, CHIANG Hsiaodong, ZHANG Boming. Study on PV-PQ bus type switching login in power flow computation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 54-59.
- [21] MARTINS N. Efficient eigenvalue and frequency response method applied to power system small-signal stability studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1986, 1(1): 217-226.

收稿日期: 2017-10-24; 修回日期: 2017-12-14

作者简介:

彭慧敏(1972—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: penghuimin@sgepri.sgcc.com.cn

袁虎玲(1985—), 女, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: yuanhuling@sgepri.sgcc.com.cn

鲍颜红(1971—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析与控制。E-mail: lifeng@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 张爱琴)