

一种电网等值分解及短路计算新方法

张武洋¹, 李籽良¹, 李永照², 陈哲², 牛雪朋²

(1. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110006; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 近年来我国电网规模及复杂性不断增加, 现有继电保护离线整定方法已越来越难满足保护性能的要求。随着广域信息测量及电网通信技术的快速发展, 继电保护在线整定无疑是解决上述问题的有效措施, 而对大型电力系统网络结构及运行方式进行快速短路计算是在线整定技术发展的一项重要前提。首先提出了一种电力系统扰动域划分方法, 在此基础上将复杂大电网等值分解为若干小型子网以简化短路及整定计算求解过程, 并进一步基于LDU分解法设计了一种采取并行运算的快速短路计算新方法。基于OPENMP并行计算平台的程序计算结果证明了新方法与传统单核串行计算相比运算速度显著提升, 为在线整定技术的发展提供了新的思路及解决方案。

关键词: 在线整定; 电网扰动域划分; 电网等值分解; 多核并行计算

A new method of power grid equivalent decomposition and short-circuit calculation

ZHANG Wuyang¹, LI Ziliang¹, LI Yongzhao², CHEN Zhe², NIU Xuepeng²

(1. State Grid Liaoning Electric Power Research Institute, Shenyang 110006, China;

2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: In recent years, the scale and complexity of Chinese power grids have increased continuously, making it increasingly difficult for existing offline setting methods to meet the requirements of relay protection. With the rapid development of wide-area information measurement and power grid communication technologies, relay protection online setting undoubtedly is an effective measure to solve the above problems. However, the fast short-circuit calculation of the large-scale power system network structure and operation mode is an important prerequisite for online setting technology development. For this reason, this paper proposes a power system disturbance area division method. Based on this, the large-scale power grid is decomposed into several small sub-networks to simplify the short-circuit calculation process. Furthermore, a new parallel computing method of fast short-circuit calculation based on LDU decomposition method is proposed. The calculation results of the program based on the OPENMP parallel computing platform proved that the computing speed of the new method is significantly improved compared with the traditional single-core serial computing. The new method provides a new idea and solution for the development of online setting technology.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677108) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGTYHT/16-JS-198).

Key words: online setting; power grid disturbance area division; power grid equivalent decomposition; multi-core parallel computation

0 引言

电网安全事关国计民生, 继电保护装置是保证电网安全的第一道防线。传统继电保护方法通过不断改进已可应对绝大部分故障及正常运行情况。但

是, 传统继电保护整定值计算原理上存在缺陷, 国内外已发生多起继电保护误动导致的严重停电事故, 如“2·4巴西大停电”、“7·30印度大停电”等^[1-3]。近年来, 随着电网迅速发展, 以特高压输电、交直流混联、新能源并网为主要特征的复杂大电网中, 传统继电保护离线整定方法难以跟踪系统运行方式的变化, 保护配置与整定日趋困难^[4-7]。在此背景下,

研究适应复杂电网结构、能够自动跟踪系统参数及运行方式变化的继电保护在线整定方法具有重要的现实意义。

长期以来,国内外专家对继电保护在线整定进行了大量的理论研究^[8-14]。其中有些在线整定系统采取“离线计算、分散存储、实时匹配”方式,这种方法显然不能从全网拓扑的角度进行整定值的配合及计算,且离线计算的整定值表大小是有限的,无法反映系统所有运行方法。而有些在线整定方法只适用于简单辐射状网络或简易环网,无法应对含大量分布式发电的配电网情况^[15-16]。

考虑到当前广域测量技术和电力通信技术的快速发展,实时获取全网电量信息,依此判断系统运行方式,并实现继电保护整定值在线修改已成为可能^[17-21]。其中,最关键也是最困难的一点便在于如何根据广域测量信息对大型电力系统网络结构及运行方式进行快速短路计算。基于上述分析,本文提出了一种将复杂大电网等值分解为若干小型子网,并对其进行快速短路计算的新方法,以适应继电保护速动性的要求,为进一步研究基于广域信息的在线整定算法打下了坚实基础。

1 电力系统扰动域划分

当电力系统运行方式或拓扑结构发生改变时,全网的潮流分布都会受到影响,此时若对全网所有继电保护设备整定值进行计算和实时更新,不仅计算量过大难以实现,而且原理上并无必要。假设发生短路故障后,线路 L 被及时切除,此时将引起电力系统全网拓扑结构发生变化,使得与 L 相连的各条线路短路电流与原先相比发生变化,继电保护设备若仍按照原先整定值设定,则可能存在误动或拒动的风险。

假设线路 L 发生短路故障,保护及时动作切除线路 L ,全网的拓扑结构将随之发生改变。此时若临近线路也发生短路故障,由于临近线路的保护整定值仍按照全网拓扑改变前进行设置,则可能导致周围线路短路电流过大或过小,进而引起保护误动或拒动。如同水中泛起的涟漪一般,离线路 L 距离越远的线路受到的影响越小,由于常规的各类继电保护方案普遍采用可靠系数以留有一定冗余度,因此,若离切除线路 L 足够远即受到的影响足够小时,便可忽略线路 L 切除带来的影响,也就无需对整定值进行重新计算并更新。

根据上述分析,将电网中受到扰动较大即需要对整定值进行重新计算的区域称为扰动域,确定扰

动域的方法如下所述^[15,22]。

给定一较小数 ε ,当电网某一节点处拓扑结构发生改变时,以该节点为圆心向外逐层计算流过每条线路的短路电流值,设拓扑变化前短路电流为 I ,变化后短路电流为 I' ,当 $|I' - I| \geq \varepsilon$ 时,说明该线路仍处于扰动域之内;当 $|I' - I| \leq \varepsilon$ 时,说明线路已基本不受系统拓扑结构改变的影响。运行方式或拓扑结构变化前后各线路短路电流差值大小成为划分扰动域的重要标准。由于系统不同运行方式下短路电流幅值存在较大差异,给 ε 的合理选取带来很大困难,考虑到保护灵敏度计算与保护范围内金属性短路电流相关,而现有继电保护装置运行整定规程中已对其大小有明确规定,因此,可采用灵敏度约束进行电力系统扰动域划分,具体如图1所示。

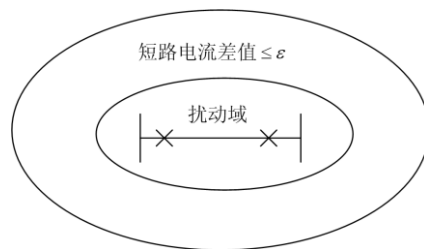


图1 扰动域示意图

Fig. 1 Disturbance area schematic

保护灵敏度是衡量继电保护性能的重要指标之一,灵敏度是考虑到可能会出现一些不利于保护启动的因素,当实际存在这些因素时,为使保护正常启动,显然必须留有一定裕度。根据《3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程》,常用的零序电流保护、限时电流速断保护、相间距离 II 段等多种保护灵敏系数 K_{sen} 均满足:当线路长度 $l \leq 20$ km 时, $K_{sen} \geq 1.5$; $20 \text{ km} \leq l \leq 50 \text{ km}$ 时, $K_{sen} \geq 1.4$; $l \geq 50 \text{ km}$ 时, $K_{sen} \geq 1.3$ 。可以看出,对于不同长度的线路而言,同种保护类型灵敏度存在 0.1 的严格差别。因此,假定当电力系统因为种种原因运行方式或拓扑结构发生变化时,若某条线路短路电流变化导致的保护灵敏度变化量 $\Delta K_{sen} \geq 0.1$,则认为该线路位于扰动域内,需要对整定值进行重新计算及更新;若线路短路电流变化导致的保护灵敏度变化量 $\Delta K_{sen} < 0.1$,则认为该线路处于扰动域之外,其整定值无需进行变更。

2 一种大电网模型等值分解新方法

由第1节中分析可知,当系统运行方式或拓扑结构发生变化时,仅需要对扰动域内的保护整定值

进行重新计算并更新。随着现有电网规模的不断增大, 全网各节点电量信息数据量十分庞大, 直接采集全部数据进行分析计算, 无疑在通信时间以及计算时间上难以满足在线整定的实时性要求。当前, 人们常采用网络分块算法进行大规模电力系统在线分析及计算。网络分块算法最初由 Kron 于 20 世纪 50 年代提出^[23], 其本质上是高维复杂大电网分割成若干个低维度的较小网络, 然后分别求解每个小网络的等值网并求出分割边界处的协调变量, 用协调变量分别计算每个小网络的电量, 最后得到原网络的解。因此, 可利用网络分块法对大电网模型进行等值分解, 将扰动域分裂出来单独计算, 这样便大大降低了求解矩阵的维数, 并可通过采取并行计算的方式进一步加快求解速度。该方法不要求解网络简化模型, 且计算方法精确、不存在理论上的误差, 很适合于当前特高压输电、交直流混联、新能源并网为主要特征的复杂大电网。

2.1 基于广域信息的电网分解等值算法

如图 2 所示, 对于任意一个给定的 N 阶电力系统网络, 由节点分裂算法可知, 其可被任意分为 s 个子网络, 这些子网络之间彼此通过理想断路器相连, 假设共有 m 个理想断路器, 则相当于原网络中 m 个节点一分为二, 整个系统节点总数增加 m 个, 分裂后节点阻抗矩阵阶数也将增加 m , 此时总节点矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1s} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{s1} & Z_{s2} & \cdots & Z_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

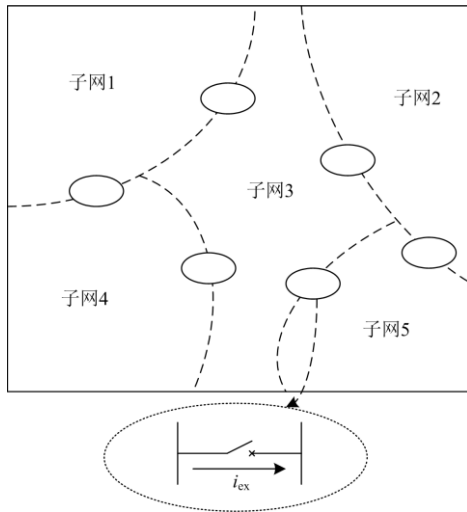


图 2 网络分解示意图

Fig. 2 Grid decomposition diagram

对其中任意子网络 x 而言, 式(1)可改写为如下形式。

$$V_x = Z_{xx} I_x + \sum_{\substack{y=1 \\ y \neq x}}^s Z_{xy} I_y \quad (2)$$

式中: Z_{xx} 为子网 x 的自阻抗矩阵; Z_{xy} 为子网 x 与子网 y 之间的互阻抗矩阵。可以看出, 当故障发生在给定子网 x 内部时, Z_{xx} 是进行后续计算所必须的, 当故障发生在子网 y 内时, 则必须获取 Z_{xy} 的信息。因此, 实现电网分解等值计算实际上就是需要找到一个求解矩阵 Z_{xx} 、 Z_{xy} 的简单有效的表达式。

根据大变化灵敏度理论^[23], 对于某一初始状态已知的系统, 当系统受到一小扰动时, 无需对整个系统进行重新求解即可获得发生扰动后的精确解。因此, 可将插入的理想断路器看作系统受到的小扰动, 通过以下步骤进行电网模型的精确求解。

(1) 令所有理想断路器断开, 求解所有独立子网各自的初始解。

此时, 各子网相互独立, 彼此间没有耦合关系, 求解方式如式(3)所示。

$$V_x^0 = Y_x^{-1} I_x, \quad x=1, L, S \quad (3)$$

分解后的各子网节点导纳矩阵阶数显著减小, 且只需获取子网内部节点的电量信息, 与获取全网各节点电量相比大为简化。若通过合理的并行计算方法, 则可做到多子网同时计算, 计算效率进一步提高。

(2) 令所有理想断路器闭合, 此时所有子网合并为原先的大电网, 此时求解方程如式(4)所示。

$$\begin{bmatrix} Y_1 & & & & \\ & Y_2 & & & \\ & & O & M & \\ & & & Y_s & C_s \\ C_1^t & C_2^t & L & C_s^t & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_s \\ I_{ex} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $C_x (n_x \times m)$ 表示子网 x 中各节点与理想断路器的关联矩阵; I_{ex} 为 m 条理想断路器支路交换的电流矢量。当理想断路器支路电流 I_{ex} 流入节点时, 令 $C_x = 1$; 当支路电流流出节点时, 令 $C_x = -1$; 当理想断路器支路与节点无电流交换时, 令 $C_x = 0$ 。上述方程若直接进行矩阵求逆运算计算量仍然较大, 通过理论推导可在式(3)中引入辅助矩阵变量 $k_{m \times m}$, 进一步简化全网求解过程, $k_{m \times m}$ 表达式为

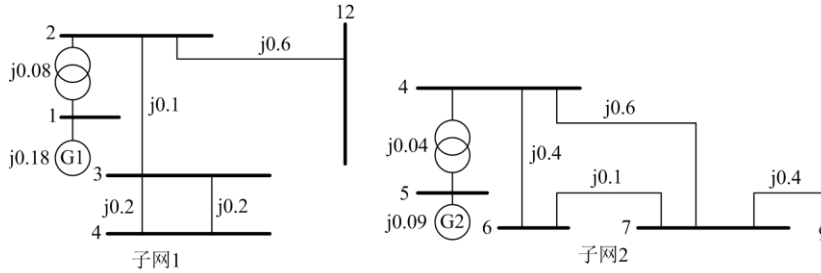
$$k_{m \times m} = \left(\sum_{x=1}^s C_x^T Y_x^{-1} C_x \right)^{-1} \quad (5)$$

根据大变化灵敏度理论,在由式(3)求得所有独立子网初始解的情况下,通过式(4)可进一步求得节点自阻抗矩阵 $\mathbf{Z}_{xx}$ 和互阻抗矩阵 $\mathbf{Z}_{xy}$, 表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{Z}_{xx} = \mathbf{Y}_x^{-1} - \mathbf{Y}_x^{-1} \mathbf{C}_x \mathbf{k} \mathbf{C}_x^T \mathbf{Y}_x^{-1} \\ \mathbf{Z}_{xy} = -\mathbf{Y}_x^{-1} \mathbf{C}_x \mathbf{k} \mathbf{C}_y^T \mathbf{Y}_y^{-1} \end{cases} \quad (6)$$

式中,易求得子网的节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}_x$, 而通过电网分解后,子网的节点数目远小于全网总节点数,因此通过式(6)对各子网进行求解比直接对全网求解更为容易。而要实现全网对各子网的等值仅需附加计算关联矩阵 $\mathbf{C}_x$ 和辅助矩阵 $\mathbf{k}$ 即可,由于 $\mathbf{C}_x$ 稀疏度很高且 $\mathbf{k}$ 阶数很小,所以计算量的增加十分有限。

通过式(6)求得 $\mathbf{Z}_{xx}$ 与 $\mathbf{Z}_{xy}$ 之后,将其代入式(2)更新子网 x 的节点电压分布,依此精确反映大电网整体运行结构及运行方式,并进一步进行扰动域内整定值的分析计算及更新,本文在此不作进一步研究。



$$\begin{aligned}
\mathbf{Z}_{11} &= \begin{bmatrix} j0.1130 & j0.0832 & j0.0567 & j0.0303 & j0.0186 \\ j0.0832 & j0.1202 & j0.0819 & j0.0437 & j0.0268 \\ j0.0567 & j0.0819 & j0.1238 & j0.0656 & j0.0202 \\ j0.0303 & j0.0437 & j0.0656 & j0.0874 & j0.0135 \\ j0.0186 & j0.0268 & j0.0202 & j0.0135 & j0.1285 \end{bmatrix} \\
\mathbf{Z}_{22} &= \begin{bmatrix} j0.0874 & j0.0605 & j0.0636 & j0.0576 & j0.0140 \\ j0.0605 & j0.0696 & j0.0440 & j0.0339 & j0.0097 \\ j0.0636 & j0.0440 & j0.2393 & j0.1832 & j0.0387 \\ j0.0576 & j0.0399 & j0.1832 & j0.2146 & j0.0449 \\ j0.0140 & j0.0097 & j0.0387 & j0.0449 & j0.0902 \end{bmatrix} \\
\mathbf{Z}_{33} &= \begin{bmatrix} j0.0709 & j0.0625 & j0.0580 & j0.0313 & j0.0269 & j0.0186 \\ j0.0625 & j0.0902 & j0.0838 & j0.0452 & j0.0388 & j0.0269 \\ j0.0580 & j0.0838 & j0.1671 & j0.0668 & j0.0500 & j0.0346 \\ j0.0313 & j0.0452 & j0.0668 & j0.1958 & j0.1173 & j0.0812 \\ j0.0269 & j0.0388 & j0.0500 & j0.1173 & j0.1285 & j0.0890 \\ j0.0186 & j0.0269 & j0.0346 & j0.0812 & j0.0890 & j0.1170 \end{bmatrix} \\
\mathbf{Z}_{12} &= \begin{bmatrix} j0.0303 & j0.0210 & j0.0233 & j0.0216 & j0.0089 \\ j0.0437 & j0.0303 & j0.0337 & j0.0312 & j0.0128 \\ j0.0656 & j0.0454 & j0.0486 & j0.0444 & j0.0134 \\ j0.0874 & j0.0605 & j0.0636 & j0.0576 & j0.0140 \\ j0.0135 & j0.0094 & j0.0217 & j0.0238 & j0.0388 \end{bmatrix} \\
\mathbf{Z}_{13} &= \begin{bmatrix} j0.0061 & j0.0089 & j0.0101 & j0.0173 & j0.0186 & j0.0128 \\ j0.0089 & j0.0128 & j0.0146 & j0.0251 & j0.0268 & j0.0186 \\ j0.0093 & j0.0134 & j0.0142 & j0.0193 & j0.0202 & j0.0140 \\ j0.0097 & j0.0140 & j0.0139 & j0.0136 & j0.0135 & j0.0094 \\ j0.0269 & j0.0388 & j0.0500 & j0.1173 & j0.1285 & j0.0890 \end{bmatrix} \\
\mathbf{Z}_{23} &= \begin{bmatrix} j0.0097 & j0.0140 & j0.0139 & j0.0136 & j0.0135 & j0.0094 \\ j0.0067 & j0.0097 & j0.0096 & j0.0094 & j0.0094 & j0.0065 \\ j0.0268 & j0.0387 & j0.0366 & j0.0239 & j0.0217 & j0.0150 \\ j0.0311 & j0.0449 & j0.0422 & j0.0264 & j0.0238 & j0.0165 \\ j0.0625 & j0.0902 & j0.0838 & j0.0452 & j0.0388 & j0.0269 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

对比等值分解前后网络的节点阻抗矩阵可知, 等值分解后各子网节点自阻抗矩阵和互阻抗矩阵中对应元素与分解前原网络节点阻抗矩阵中对应元素完全相等, 从而证明了所提电网分解等值算法的准确性, 并可在此基础上进一步进行故障分析及扰动域内继电保护整定值的重新计算。

3 多核并行计算在电力系统短路计算中的应用研究

随着我国电网的迅速发展, 电网电压等级的不断提升、电网规模的不断扩大对继电保护速动性提出了更高的要求。与传统离线整定不同, 在线整定并不需考虑所有极端运行工况, 而是根据电网实时运行状况动态调整各线路保护整定值, 这无疑对整定计算的实时性有着更高的要求。举例而言, 假设电网运行方式发生较大变动, 由于计算能力限制, 新整定值未及时计算出并实时更新原有整定值, 则扰动域内各继电保护装置仍将沿用原先整定值。若

此时发生新的故障, 由于原先整定值已不适用于该运行方式的电网, 则保护很有可能发生误动或拒动, 进一步扩大故障范围, 甚至可能引发连锁故障。

短路计算作为继电保护整定值计算的关键环节之一, 若能大幅提升电网短路计算能力, 则将加快在线整定系统的整定值刷新速度。其中, 并行计算无疑是大规模提升计算速度的重要措施之一^[24]。下面设计了一种电力系统节点阻抗矩阵的并行求解方案。

3.1 一种基于并行 LDU 分解的短路计算新方法

电力系统短路计算本质上就是对多阶代数方程组进行求解。并行计算是将其中无关联的部分进行分割, 并合理安排给不同的核心去完成。利用 LDU 分解法对代数方程组直接求解是当前电力系统短路计算中的常用方法^[25], 其基本计算方法如下。

设 $\mathbf{A}$ 为 n 阶节点导纳矩阵, 易知 $\mathbf{A}$ 为对称正定矩阵, 则根据线性代数理论可知 $\mathbf{A}$ 可唯一分解为单位下三角矩阵 $\mathbf{L}$ 、对角线矩阵 $\mathbf{D}$ 与单位上三角矩阵 $\mathbf{U}$ 乘积的形式, 即 $\mathbf{A} = \mathbf{LDL}^T$ 。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ l_{21} & 1 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n1} & l_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} d_1 & & & \\ & d_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & d_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & l_{12} & \dots & l_{1n} \\ & 1 & \dots & l_{2n} \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

单位下三角矩阵 $\mathbf{L}$ 、对角线矩阵 $\mathbf{D}$ 中各元素的计算公式为

$$\begin{cases} l_{ij} = \left(a_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} l_{ik} d_k l_{jk} \right) / d_j & (i=1, 2, \dots, n \quad j=1, 2, \dots, i-1) \\ d_i = a_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik}^2 d_k & (i=1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (8)$$

为防止重复计算, 引入过渡因子 $C_{ij} = l_{ij} d_j$, 则式(8)可改写为如下形式。

$$\begin{cases} c_{ij} = a_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} c_{ik} l_{jk} & (i=1, 2, \dots, n \quad j=1, 2, \dots, i-1) \\ l_{ij} = c_{ij} / d_j & (i=1, 2, \dots, n \quad j=1, 2, \dots, i-1) \\ d_i = a_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} c_{ik} l_{ik} & \end{cases} \quad (9)$$

可以看出, 矩阵 $\mathbf{L}$ 中任意元素 l_{ij} 与矩阵 $\mathbf{D}$ 中同一行的元素 d_i 以及由此计算得到的 c_{ij} 相互关联, 所

以如果按行进行计算,则只能按顺序依次求解。为利用并行计算方法加快求解速度,通过观察式(9),可将通过累加和计算的按行求解替换为通过迭代刷新的按列求解过程,具体算法如下。

$$\begin{aligned}
 (1) & a_{ij}^1 = a_{ij}, 1 \leq j \leq i \leq n \\
 (2) & \text{for } j=1 \text{ to } n-1 \\
 & d_j = a_{jj}^j, c_{ij} = a_{ij}^j, i = j+1, L, n \\
 & a_{pq}^{j+1} = a_{pq}^j - c_{pj} \cdot c_{qj} / d_j, j+1 \leq q \leq p \leq n \\
 & l_{ij} = c_{ij} / d_j, i = j+1, L, n \\
 (3) & d_n = a_{nn}^n
 \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)中, a_{ij}^j 是 a_{ij} 的第 j 次迭代。由式(10)中步骤(2)可以看出,第 $j+1$ 列至第 n 列计算过程无关联性,因此可以将其分配到多核 PC 机上进行多线程运算,求得矩阵 L 和矩阵 D 中各元素之后,可按照式(11)计算出节点阻抗矩阵中各元素的值,并在此基础上进行后续的短路计算及扰动域内继电保护整定值的实时计算与更新。

$$\begin{cases} f_i^{i+1} = f_i^j - l_{ij} f_j & i > j \\ h_i = f_i / d_i & i \geq j \\ z_{ij} = h_i - \sum_{k=i+1}^n u_{ik} z_{kj} & i = n, n-1, L, 1 \end{cases} \quad (11)$$

3.2 算法验证

针对 3.1 节所提改进算法,下面基于 OPENMP 并行计算平台,分别计算了不同节点数目的电力系统模型在多核 PC 机上的求解速度,并将其与传统的单核串行计算进行对比,结果如表 1 所示。

根据表 1 可知,当系统规模较大时,采取多核并行计算方法与传统串行计算进行对比,计算速度会大幅提升,加速比最高能到达 1.41,但由于多核计算中负载平衡等难题,加速比无法达到理想情况下的 2。若增加运算的 CPU 核数,则计算速度可进一步提升。

表 1 并、串行短路计算速度对比

Table 1 Comparison between multi-core parallel computation and serial computation

		计算时间/ms			
		500 阶	1 000 阶	1 500 阶	2 000 阶
串行	实验 1	4 437	44 625	163 437	409 594
	实验 2	4 469	44 547	163 375	409 078
	平均值	4 453	44 586	163 406	409 336
双核	实验 1	3 531	32 141	116 125	290 750
	实验 2	3 531	31 891	115 594	291 141
	平均值	3 531	32 016	115 859.5	290 945.5
加速比		1.261	1.393	1.41	1.407

4 结论

本文对目前继电保护在线整定面临的计算量大和计算速度慢的难题进行了初步分析研究,提出按照保护灵敏度进行电力系统扰动域划分,在此基础上将复杂大电网等值划分为若干小子网单独求解,并进一步设计出一种基于 LDU 分解的并行计算新方法。利用所提新方法可在电网拓扑结构及运行方式改变时,针对按扰动域划分的子网独立、并行地进行短路计算,并可根据其结果进一步进行整定计算以实时更新保护整定值,为在线整定技术的发展提供了新的思路及解决方案。

参考文献

- [1] 刘宇,舒治淮,程道,等.从巴西电网“2·4”大停电事故看继电保护技术应用原则[J].电力系统自动化,2011,35(8):12-15,71.
LIU Yu, SHU Zhihui, CHENG Xiao, et al. Analyzing principle of protection through the blackout in Brazil power grid on February 4, 2011[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 12-15, 71.
- [2] 董新洲,曹润彬,王宾,等.印度大停电与继电保护的三大功能[J].电力系统保护与控制,2013,41(2):19-25.
DONG Xinzhou, CAO Runbin, WANG Bin, et al. India blackout and three functions of protective relay[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 19-25.
- [3] 金能,李正天,林湘宁,等.应对全站采样信息缺失的应急保护系统[J].中国电机工程学报,2017,37(8):2203-2215.
JIN Neng, LI Zhengtian, LIN Xiangning, et al. Emergency protection system dealing with sampling information loss within a whole substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2203-2214.
- [4] 李婷,胥威汀,刘向龙,等.含高比例可再生能源的交直流混联电网规划技术研究综述[J].电力系统保护与控制,2019,47(12):177-187.
LI Ting, XU Weiting, LIU Xianglong, et al. Review on planning technology of AC/DC hybrid system with high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 177-187.
- [5] 王超,常海军,摆世彬,等.高比例新能源与多直流场景下连锁故障防控策略研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(7):49-57.
WANG Chao, CHANG Haijun, BAI Shibin, et al. Study on the prevention and control strategy of cascading failure of bulk power system with multi-HVDC and high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 49-57.
- [6] 张兆云,林璞,王星华.交直流混合配电网继电保护研究综述[J].电力系统保护与控制,2019,47(5):179-187.
ZHANG Zhaoyun, LIN Pu, WANG Xinghua. Review on relay protection of AC/DC hybrid distribution grids[J].

- Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 179-187.
- [7] ZHANG B, HAO Z, BO Z. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [8] CHEN Xin, LÜ Feipeng, LI Yunkun, et al. Protective relaying on-line setting calculation system[C] // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, March 28-31, 2010, Chengdu, China: 1-4.
- [9] OJAGHI M, SUDI Z, FAIZ J. Implementation of full adaptive technique to optimal coordination of overcurrent relays[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 235-244.
- [10] 曹国臣. 继电保护整定计算中故障计算的通用方法[J]. 电网技术, 2002, 30(12): 24-29.
CAO Guochen. A versatile method to calculate faults for protective relaying setting[J]. Power System Technology, 2002, 30(12): 24-29.
- [11] 段献忠, 杨增力, 程道. 继电保护在线整定和离线整定的定值性能比较[J]. 电力系统自动化, 2005, 33(19): 58-61.
DUAN Xianzhong, YANG Zengli, CHENG Xiao. Performance analysis of relay settings determined according to off-line calculation and on-line calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 33(19): 58-61.
- [12] 吕颖, 吴文传, 张伯明, 等. 电网保护定值在线整定系统的开发与实践[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 15-20.
LÜ Ying, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Development and application of an on-line relay setting coordination system[J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 15-20.
- [13] 蒙亮, 朱林, 陈金富. 继电保护定值在线核对系统设计[J]. 电气技术, 2012(11): 59-62.
MENG Liang, ZHU Lin, CHEN Jinfu. Design of on-line checking system of protection setting[J]. Electrical Engineering, 2012(11): 59-62.
- [14] 朱晓华, 李一泉, 杨韵, 等. 继电保护定值审核专家库系统[J]. 广东电力, 2013, 26(7): 78-81, 85.
ZHU Xiaohua, LI Yiquan, YANG Yun, et al. Expert database system for relay protection setting value examination and verification[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(7): 78-81, 85.
- [15] 曹国臣, 蔡国伟, 王海军. 继电保护整定计算方法存在的问题与解决对策[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 51-56.
CAO Guochen, CAI Guowei, WANG Haijun. Problems and solutions in relay setting and coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 51-56.
- [16] 蔡燕春, 张少凡, 杨咏梅, 等. 20 kV 环网继电保护整定与运行分析[J]. 广东电力, 2016, 29(2): 64-69.
CAI Yanchun, ZHANG Shaofan, YANG Yongmei, et al. Analysis on relay protection setting and operation of 20 kV loop network[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(2): 64-69.
- [17] 鞠平. 电力系统广域测量技术[M]. 北京: 机械工业出版社. 2008.
- [18] 程云峰, 张欣然, 陆超. 广域测量技术在电力系统中的应用研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 145-153.
CHENG Yunfeng, ZHANG Xinran, LU Chao. Research progress of the application of wide area measurement technology in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 145-153.
- [19] SIDHU T S, BALTAZAR D S, PALOMINO RM, et al. A new approach for calculating zone-2 setting of distance relays and its use in an adaptive protection system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 70-77.
- [20] YANG F. Research of relay protection setting calculation system for power plant based on multi-agent[C] // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, March 28-31, 2010, Chengdu, China: 1-4.
- [21] 冷贵峰, 方胜文, 王荣, 等. 继电保护定值在线整定软件开发与实践[J]. 电力大数据, 2018, 21(5): 78-81.
LENG Guifeng, FANG Shengwen, WANG Rong, et al. Development and application of on-line setting software for relay protection[J]. Power Systems and Big Data, 2018, 21(5): 78-81.
- [22] 陈新, 吕飞鹏, 蒋科, 等. 基于多代理技术的智能电网继电保护在线整定系统[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 167-173.
CHEN Xin, LÜ Feipeng, JIANG Ke, et al. Protective relaying on-line coordination and calculation system of smart grid based on MAS[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 167-173.
- [23] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [24] 周伟明. 多核计算与程序设计[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009.
- [25] 李亚楼, 周孝信, 吴中习. 一种可用于大型电力系统数字仿真的复杂故障并行计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 1-5.
LI Yalou, ZHOU Xiaoxin, WU Zhongxi. A parallel complex fault computation algorithm for large scale power system digital simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 1-5.

收稿日期: 2019-08-29; 修回日期: 2019-11-04

作者简介:

张武洋(1982—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为自动化系统; E-mail: zwy_ldk@126.com

李籽良(1984—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为自动化系统; E-mail: lizl_ldk@126.com

李永照(1981—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为自动化系统。E-mail: xjtc_liyongzhao@126.com

(编辑 许威)