

基于电流矩方法的配电网动态重构研究

屠强, 郭志忠

(哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对辐射网络电能量的计算与分析问题, 依据积分中值定理提出了电流矩中值的概念, 形成了电流矩中值潮流模型, 证明了电流矩中值形式的电能量损失定理。该定理将电能量的时间过程积分问题转化为电流矩中值问题, 为简化网络能量损失的计算与优化问题奠定了基础。作为应用, 进一步提出了辐射型配电网动态重构的电流矩中值方法。方法将面向时间过程的动态重构问题转化为面向电流矩中值的静态重构问题, 大幅度简化了计算过程, 数值仿真的结果验证了方法的有效性。

关键词: 配电网; 电能量; 动态重构; 电流矩中值; 中值潮流

Current moment-based method for dynamic reconfiguration research in distribution network

TU Qiang, GUO Zhi-zhong

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Considering the energy-based calculation and analysis of the radial network and the mean value theorem for integrals, the concept of the median current moment is presented and the power flow model based on this concept is established accordingly. The energy-based loss theorem is verified. This theorem transfers the problem of energy-based, time-oriented integrals into that of the median current moment, which lays the foundation of network loss calculation based on electricity energy. Based on the concept and model above, the median current moment method is developed for dynamic reconfiguration in distribution network. This method transfers the dynamic reconfiguration problem into the static median reconfiguration based on median current moment, which simplifies the computation process. Simulation results testify the validity of this method.

Key words: distribution network; electricity energy; dynamic reconfiguration; median current moment; median power flow

中图分类号: TM71

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)09-0022-04

0 引言

通过负荷转移的手段, 配电网重构在故障情况下保证供电可靠性, 在正常情况下保证电压合格率和降低线路损失, 是配网重要的运行操作手段。

由于设备因素和管理因素, 配电网的联络开关不可能频繁地投切。如此, 配电网重构应该谋求降低一段时间内线路的电能量损失, 而不是一个时间断面的线路功率损失的降低, 后者没有时间过程最优的意义。所以, 更具有实用化价值的配电网重构应该是面向时间过程的动态重构, 而不是面向时间断面的静态重构。

动态重构已经引起了电力工程界和学术界的重视。静态重构本身就是一个 NP 难问题, 动态重构使问题变得更加复杂。已经发表的学术论文^[1~5]基本都采用时间过程的分割方法: 将复杂的时空优化问题转化为若干静态优化问题^[6]。这样做法尽管使问题得到了简化, 但是仍然具有烦琐性。假设一

个静态重构方法的计算量是 M_s , 假设动态重构需要 N 次静态重构的计算, 那么动态重构总计算量为

$$M_d = N \times M_s$$

静态重构的次数越多, 计算效率越低, 这还没有考虑动态重构结果的优化质量。

在文献[7, 8]基础上, 文献[9]提出了辐射型配电网的电流矩模型, 物理概念清楚, 方法简单实用, 较好地解决了静态重构问题。

动态重构问题是网络电能量损失的优化问题。在文献[9]的基础上, 本文直接从电能量出发, 提出了电流矩中值模型, 提出了电能量中值潮流的概念, 把电流矩中值模型与中值潮流计算结合起来形成了配电网动态重构的电流矩中值方法。方法将配电网动态重构问题转化为电流矩中值的中值静态重构问题, 大幅度简化了计算过程, 数值仿真的结果证明了方法的有效性。

1 基本概念

1.1 必要的概念^[9]

1) 逆流而上, 节点 n_i 到源节点 n_0 所经历的支路集合和节点集合构成逆流路径 W_i 。

2) 逆流路径 W_i 的所有支路阻抗之和叫做 W_i 的阻抗距离。就是

$$Z_i = \sum_{b_j \in W_i} z_{b_j} \quad (1)$$

3) 设 $n_k, n_s \in W_i$, 并且 n_s 是 n_k 的子节点, 那么

$$\tilde{I}_{nk}^1 = I_{bk} - I_{bs} \quad (2)$$

叫做 n_k 的节点等效一次电流, 其中, 上标“•”表示相量, 并且

$$\tilde{I}_{nk}^2 = I_{bk}^2 - I_{bs}^2 \quad (3)$$

叫做 n_k 的节点等效二次电流。其中, I_{bk} 和 I_{bs} 为电流幅值。

1.2 电流矩中值

定义 1 (节点等效电流中值): 对确定的时间过程

$$T = (t_e - t_b) \quad (4)$$

称

$$\bar{I}_{nk}^k = \frac{1}{T} \int_{t_b}^{t_e} \tilde{I}_{nk}^k dt \quad (k=1,2) \quad (5)$$

为节点等效电流中值。 \bar{I}_{nk}^1 为节点等效一次电流中值, \bar{I}_{nk}^2 为节点等效二次电流中值。

定义 2 (电流矩中值): 对于时间过程 T , 逆流路径 W_i 的电流矩中值为

$$\bar{T}_{W_i}^k = \sum_{n_j \in W_i} Z_k \bar{I}_{nj}^k \quad (k=1,2) \quad (6)$$

这里, $\bar{T}_{W_i}^1$ 叫做一次电流矩中值, 具有电压量纲; $\bar{T}_{W_i}^2$ 叫做二次电流矩中值, 具有功率量纲。

定义 3 (电流矩中值均衡度): 两个不同的电流矩中值 $\bar{T}_{W_i}^1$ 与 $\bar{T}_{W_j}^2$ 之差

$$\bar{B}^k(n_i, n_j) = \bar{T}_{W_i}^k - \bar{T}_{W_j}^k \quad (k=1,2) \quad (7)$$

是这两个电流矩中值的平衡度。

2 基本定理

定理 1 (电压损失中值定理): 在时间过程 T 内,

逆流路径 W_i 的电压损失中值 $\Delta \bar{V}(W_i)$ 等于该路径的一次电流矩中值 $\bar{T}_{W_i}^1$ 。就是

$$\Delta \bar{V}(W_i) = \bar{T}_{W_i}^1 \quad (8)$$

证明: 根据文献[9]的电流矩定理, 逆流路径 W_i 的电压损失 $\Delta \dot{V}(W_i)$ 等于该路径的一次电流矩 T_i^1 , 就是

$$\Delta \dot{V}(W_i) = T_{W_i}^1 \quad (9)$$

从而

$$\frac{1}{T} \int_{t_b}^{t_e} \Delta \dot{V}(W_i) dt = \frac{1}{T} \int_{t_b}^{t_e} T_{W_i}^1 dt \quad (10)$$

定理成立。

定理 2 (电能量损失定理): 在时间过程 T 内, 逆流路径 W_i 的电能量损失为

$$\Delta E_{W_i} = T \times \bar{T}_{W_i}^2 \quad (11)$$

证明: 根据文献[9]的电流矩定理, 逆流路径 W_i 的功率损失 $\Delta \dot{S}(W_i)$ 等于该路径的二次电流矩 $\bar{T}_{W_i}^1$, 就是

$$\Delta \dot{S}(W_i) = T_{W_i}^2 \quad (12)$$

所以

$$\int_{t_b}^{t_e} \Delta \dot{S}(W_i) dt = \int_{t_b}^{t_e} T_{W_i}^2 dt = \int_{t_b}^{t_e} \sum_{n_k \in W_i} Z_k \tilde{I}_{nk}^2 dt = \sum_{n_k \in W_i} Z_k \int_{t_b}^{t_e} \tilde{I}_{nk}^2 dt \quad (13)$$

考虑式 (5), 有

$$\int_{t_b}^{t_e} \Delta \dot{S}(W_i) dt = T \sum_{n_k \in W_i} Z_k \bar{I}_{nk}^2 \quad (14)$$

根据式 (6), 得到

$$\int_{t_b}^{t_e} \Delta \dot{S}(W_i) dt = T \times \bar{T}_{W_i}^2 \quad (15)$$

由于

$$\Delta E_{W_i} = \int_{t_b}^{t_e} \Delta \dot{S}(W_i) dt \quad (16)$$

所以定理成立。

3 配电网动态重构的电流矩中值方法

采用电流矩中值方法的配电网动态重构的核心思想是: 将时间过程 T 内变化的节点等效二次电

流用节点等效二次电流中值表达, 根据定理 2, 采用二次电流矩中值均衡的方法确定闭合与开断的联络开关, 最终获得动态重构的优化结果。

3.1 电能量中值潮流

对于时间过程 T , 根据节点电能量得到节点注入功率的中值, 就是

$$\begin{aligned}\bar{S}_{ni} &= \bar{P}_{ni} + j\bar{Q}_{ni} \\ \bar{P}_{ni} &= \frac{1}{T} E_{ni}^P \\ \bar{Q}_{ni} &= \frac{1}{T} E_{ni}^Q\end{aligned}\quad (17)$$

其中: E_{ni}^P 和 E_{ni}^Q 为在时间过程 T 内节点 n_i 的有功电量和无功电量。

以节点注入功率中值为基础数据的潮流叫做电能量中值潮流。

电能量中值潮流计算得到的支路电流与节点电流叫做支路电流中值 \bar{I}_{bk} 和节点电流中值 \bar{I}_{nk} 。并且

$$\bar{I}_{bk}^2 = \bar{I}_{bk} \hat{I}_{bk} \quad (18)$$

3.2 节点等效二次电流中值的计算

根据式 (3) 和式 (5), 有

$$\bar{I}_{nk}^2 = \frac{1}{T} \int_{t_b}^{t_e} (I_{bk}^2 - I_{bs}^2) dt = \frac{1}{T} \int_{t_b}^{t_e} I_{bk}^2 dt - \frac{1}{T} \int_{t_b}^{t_e} I_{bs}^2 dt \quad (19)$$

利用电能量中值潮流的计算结果, 近似地认为

$$\bar{I}_{bk}^2 \approx \frac{1}{T} \int_{t_b}^{t_e} I_{bk}^2 dt \quad (20)$$

利用上式的结果求得二次电流矩中值 \bar{T}_{wi}^2 。

3.3 闭合开关的选择

用 S^o 表示处在开断状态的联络开关集合。

设开关 $s_k \in S^o$, s_k 两边的节点为 n_i 和 n_j 。分别计算这两个节点的二次电流矩中值 \bar{T}_{wi}^2 和 \bar{T}_{wj}^2 , 令

$$\bar{T}_{wi}^2(P) = \text{Re}(\bar{T}_{wi}^2) \quad (21)$$

根据上式得到二次电流矩平衡度中值的实部, 就是

$$\bar{B}_P^2(n_i, n_j) = \text{Re}(\bar{B}^2(n_i, n_j)) \quad (22)$$

对于集合 S^o 的所有联络开关做 $\bar{B}_P^2(n_i, n_j)$ 的遍历计算, 满足

$$\max_{s_k \in S^o} |\bar{B}_P^2(n_i, n_j)| \quad (23)$$

条件的联络开关为闭合开关 s_{close} 。

3.4 开断开关的选择

合上开关 s_{close} , 形成一个单环网 C^s 。

设开关 $s_k \in C^s$, s_k 两边的节点为 n_i 和 n_j 。开断 s_k , 分别计算这两个节点的二次电流矩中值 \bar{T}_{wi}^2 和 \bar{T}_{wj}^2 , 计算它的平衡度中值 $\bar{B}_P^2(n_i, n_j)$ 。

对集合 C^s 中的所有联络开关做 $\bar{B}_P^2(n_i, n_j)$ 的遍历计算。满足

$$\min_{s_k \in C^s} |\bar{B}_P^2(n_i, n_j)| \quad (24)$$

条件的联络开关为开断开关 s_{open} 。

3.5 计算步骤

1) 根据时间过程 T 各节点的能量 W_{Pi} 和 W_{Qi} , 得到节点中值有功功率和无功功率 P_i^{av} 和 Q_i^{av} 。

2) 根据 P_i^{av} 和 Q_i^{av} 进行中值潮流的计算, 得到节点的中值电压中值电流。

3) 按照式 (21) 和式 (22) 求取待闭合开关集合中每个开关对应的二次电流矩中值和二次电流矩平衡度中值。

4) 按式 (23) 原则选定待合开关, 模拟开关闭合后形成的单环网, 进行时间过程 T 的单环网中值潮流计算, 得到单环网各节点的中值电压。

5) 对单环网内的各开关进行模拟开断操作, 以环网中的各节点共有的父节点 f 为平衡支点, 按式 (21) 和式 (23) 逐个计算每条支路二次电流矩以及二次电流矩平衡度中值, 按式 (24) 确定开断开关。

6) 计算中值断面潮流, 检查开断后支路是否过载, 若过载, 选择开断支路的下一个开断, 直到无支路过载为止。

7) 若待开支路与刚合上的支路相同, 说明该开关已处于平衡状态, 将它排列到待合开关的序列尾端, 在待闭合队列中选择下一个作为待合开关, 返回 4)。若所有开关都已平衡, 转 9)。

8) 打开待开开关, 修正网络结构, 转 2)。

9) 输出结果, 计算结束。

3.6 计算结果

算例采用的模拟系统为 69 节点配网^[12], 该系统包含 5 个联络开关。进行了时间过程为天的数值仿真计算。对文献[12]所提供的基态负荷, 考虑整体负荷水平变化情况以及负荷分布变化情况, 分别

得到一天 6 个时段过程的能量预测值(设每时段持续时间相同即 4 小时),根据这 6 个时段的能量预测值得到代表这一天的中值负荷模式。按照 3.5 的计算步骤计算,其优化结果如表 1 和表 2 所示。

将表 1 的优化结果用于每个时段能量预测值进行损耗对比计算,得到结果如表 2。

由表 2 可知,这一天总共节约能量达 2 224.4(kW·h)。

表 1 二次电流矩中值法优化结果

Tab.1 Optimal result of quadratic current moment method

动作 序列	闭合首末 节点号	断开首末 节点号	能量损耗 /kW·h
0	初态	初态	4548
1	7, 54	49, 50	3276
2	18, 63	9, 10	2 882.4
3	12, 34	13, 12	2 577.6
4	9, 38	7, 8	2 481.6
5	9, 10	11, 10	2 318.4

表 2 多时段负荷重构前后对比

Tab.2 Comparison of multi-load profiles before and after reconfiguration

负荷时段 序列	能量损耗情况/kW·h		节约能量 /kW·h
	重构前	重构后	
1	744.8	452.4	292.4
2	668	356	312
3	552.8	269.2	283.6
4	635.2	330.8	304.4
5	1130.8	595.6	535.2
6	936.8	440	496.8

由表 1 和表 2 的仿真结果表明,对于多时段负荷模式,当对其代表典型特征的中值断面采用二次电流矩中值进行优化后,将其优化结果用于这些不同负荷时段模式时,能量损耗都有较明显的下降,也即中值断面优化结果适用过程中的所有时段过程。由仿真结果也可知,各种时段负荷模式的电压水平也有显著改善,详细结果不再列出。

4 结论

本文在定义了电流矩中值和电流矩中值平衡度的概念的基础上,提出并推导了电压损失中值定理和电能量损失定理。从电能量出发,把电流矩中值模型与中值潮流计算结合起来形成了配电网动态重构的电流矩中值方法。仿真结果表明,电流矩中值法具有简便性,很好地避免了以往方法的复杂性。算例表明,优化结果具有实用价值。

参考文献

- [1] 邓佑满,张伯明,田田.虚拟负荷法及其在配电网动态优化中的应用[J].中国电机工程学报,1996,16(4). DENG You-man, ZHANG Bo-ming, TIAN Tian. A Fictitious Load Algorithm and Its Applications to Distribution Network Dynamic Optimizations[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(4).
- [2] 尹丽燕,于继来.多时段落的配电网动态重构[J].中国电机工程学报,2002,22(7). YIN Li-yan; YU Ji-lai. Dynamic Reconfiguration of Distribution Network with Multi-time Periods[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7).
- [3] 吴建中,余贻鑫.最小化运行费用的时变重构全局优化算法[J].中国电机工程学报,2003,23(11). WU Jian-zhong, YU Yi-xin. Global Optimization Algorithm to time-varying Reconfiguration for Operation Cost Minimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11).
- [4] Chen C S, Cho M Y, Determination of Critical Switches in Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992,7(3).
- [5] Chen C S, Cho M Y. Energy Loss Reduction by Critical Switch[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993,8(3).
- [6] 刘蔚.基于运行模式的配电网优化(博士学位论文)[D].杭州:浙江大学,2006. LIU Wei. Operating Pattern based Distribution System Optimization, Doctoral Dissertation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [7] 蔡中勤,郭志忠,陈学允.配电网重构的均衡视在精确矩法[J].继电器,2000,28(12). CAI Zhong-qin, GUO Zhi-zhong, CHEN Xue-yun. Poised Apparent Accurate Moment Method for Distribution Network Reconfiguration[J]. Relay, 2000,28(12).
- [8] CAI Zhong-qin, GUO Zhi-zhong. Reactive Power Moment Method for Optimal Compensation on Radial Distribution Systems[A]. In: POWERCON'98[C]. Beijing: 1998. 1435-1437.
- [9] 屠强,郭志忠.辐射型配电网的电流矩模型及其重构应用研究[J].中国电机工程学报,2006,26(16). TU Qiang, GUO Zhi-zhong. The Quadratic Current Moment for Radial Distribution Network Reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2006,26(16).

收稿日期:2006-09-26

(下转第 31 页 continued on page 31)

- Technology, 2006,30(17).
- [2] Thio C V, Davies J B, Yent K L. Commutation Failures in HVDC Transmission Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 946-957.
- [3] 欧开健, 任震. 直流输电系统换相失败的研究(一)——换相失败的影响因素分析[J]. 电力自动化设备, 2003,(5).
OU Kai-jian, REN Zhen. Research on Commutation Failure in HVDC Transmission System, Part I: Commutation Failure Factors Analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003,(5).
- [4] 杨卫东, 薛禹胜. 南方电网中多个直流系统间的协调功率恢复策略[J]. 电力系统自动化, 2003,27(15).
YANG Wei-dong, XUE Yu-sheng. A Coordinated Recovery Strategy for 3 HVDC Systems Involved in the South China Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(15).
- [5] 欧开健, 任震. 多馈入直流输电系统换流母线电压稳定性评估模型和算法[J]. 电力自动化设备, 2003,(9).
OU Kai-jian, REN Zhen. Model and Algorithm for Assessing Voltage Stability at Commutation Buses in MIDC System.[J] Electric Power Automation Equipment, 2003,(9).
- [6] ZHOU Chang-chun, XU Zheng. Study on Commutation Failure of Multi-infeed HVDC System[A]. In: PowerCon International Conference on Power System Technology[C]. 2002.
- [7] 项玲, 郑建勇. 多端和多馈入直流输电系统中换相失败的研究[J]. 电力系统自动化, 2005,29(15).
XIANG Ling, ZHENG Jian-yong. Study on Commutation Failure in MTDC and MIDC Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005,29(15).
- [8] Nayak R N, Sasmal R P. AC/DC Interactions in Multi-infeed HVDC Scheme: a Case Study[A]. In: Power India Conference[C]. 2006.
- [9] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社.
LI Xing-yuan. High Voltage Direct Current Transmission System Operation and Control[M]. Beijing: Science Press.
- [10] Szechtman N, Thio C V. First Benchmark Model for HVDC Control Studies[J]. Electra, 1991, 135.
- [11] 张建设, 张尧. 直流系统控制方式对大扰动后交直流混合系统电压和功率恢复的影响[J]. 电网技术, 2005,29(5).
ZHANG Jian-she, ZHANG Yao. Influence of DC System Control Modes on Voltage and Power Recovery After Large Disturbance in Hybrid AC/DC Systems[J]. Power System Technology, 2005,29(5).
- [12] 中国版 BPA 暂态稳定程序用户手册[Z]. 中国电力科学研究院.
Chinese Version BPA Transient Stability Manual Book[Z]. Chinese Electric Power Research Institute.
- [13] 李峰, 管霖. 广东交直流混合电网的运行稳定性研究[J]. 电网技术, 2005,29(11).
LI Feng, GUAN Lin. Study on Stability of GUANGDONG AC/DC Hybrid Power Grid[J]. Power System Technology, 2005,29(11).

收稿日期: 2006-11-15; 修回日期: 2006-12-26
作者简介:

吴冲(1981-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压直流输电的建模与仿真、电力系统稳定与控制;
E-mail:wuchong624@163.com

李兴源(1945-), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定与控制、高压直流输电、分布式发电等研究。

郭志忠(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制, 电力系统的自动化与信息化, 电力系统光学测量技术等。E-mail:zhizhongg@bjxj-xjgc.com

(上接第 25 页 continued from page 25)
作者简介:

屠强(1958-), 男, 博士研究生, 研究方向为配电网线损管理和电力系统的调度与控制;

大丰风力发电设备总装项目开工

4月8日, 总投资1000万欧元的风力发电设备总装项目在江苏大丰经济开发区开工建设。

该项目由中德合资——江苏夏天诺德文德能源设备有限公司投资建设, 主要生产850千瓦级和1600千瓦级大型风力发电设备, 属大功率水平轴双叶变桨变速风力发电机, 制造技术直接来源于德国, 产品主要性能国内领先, 其中多项性能处于目前国际最新技术水平。建成后, 可年产200台风力发电机组。据介绍, 在该项目的基础上, 夏天诺德文德公司将联合国内外风能产业零部件生产厂家, 共同投资建设一个18至20亿元规模的风能设备产业链园区。