

配电网负荷均衡重构方法在配电网调度及运维检修中的应用

为了解决配电网中存在馈线重过载问题，提出了一种配电网负荷均衡重构的方法。该方法针对负荷动态特性建立了馈线过载量化模型，综合利用大数据，通过重过载馈线及其各邻接馈线联络开关、分段开关的状态调整，确定最优的馈线负荷均衡方案。此配电网负荷均衡重构方法在配电网调度及运维检修中的应用，可有效地提高电网调度管理和运维检修的效率，值得进一步深入研究和推广应用。

朱翀霄 郑伟 宋鸿雁 马小珍 李 宁/银川供电公司发展策划部

0 引言

配电网作为供配电输送的最后一个环节，是供电企业为用户提供电力服务的基础，不仅影响着供配电的稳定性，还影响着用户用电安全。众所周知，配电网分布广，线路庞杂，数据大，且拓扑复杂，特征之一就是配电网馈线（10/20 kV）重过载及负荷不均衡，管理难度相当大，管理水平远远不能与主网相比^[1]。根据2013~2015年官方公布数据显示，河北电力辖区内11个地市配电网馈线负荷不均衡现象都比较突出。在配电网馈线不均衡情况下，馈线可能出现弧垂增大、线路老化、电压下降和线损增强等问题，严重降低配电网运行的安全性与经济性。为解决配电网馈线重过载和负荷不均衡现象，主要有两种办法：一是实施扩容改造工程，但是工程建设周期长、成本高，需投入大量的人力、物力；另一个是利用拓扑结构、配电网特征等重构配电网，挖掘配电网自身潜能。中压配电网通常是闭环设计、开环运行，整个网络中有着大量的分段

开关和联络，对这些分段开关进行重新组合就可以实现配电网拓扑结构重构，进而优化运行方式，改善以往运行中的问题，使配电网运行安全可靠。目前，与配电网重构相关的理论不多，且绝大多数应用在了网损降低上面，关于配电网重负载、负荷均匀性的理论文献则很少^[2-3]。文献[4]提出，将负荷低处的馈线偶联络开关转移至负荷高的馈线端，使负荷转移，优化配电网馈线运载；文献[5]基于文献[4]提出更优化的方法，使转移负荷接近于理论最优值。以上两种方法理论上虽然可行，但是存在一定的局限性，具体包括：第一，用到的所有分支负载率和馈线都是针对某个时间断面或某段时间的，不具有代表性，精细程度不够，不能完全反映配电网馈线实际运行过程中的动态特性；第二，没有考虑节假日、气候变化及未来业务扩展等因素对负荷的影响；第三，提出的方法需要对辖区内的配电网联络开关进行调整，实际操作性不高。

近年来，随着营配调一体化工作的持续推进，配电自动化、故障抢修、停电分析、业务扩展管理和用电信息采集等系统的建设完善，极大提高了配电网数据的质量，为配电网管理提升奠定了良好的数据基础。本文基于大数据理念进行分析和建模^[8-10]，利用馈线及配电变压器负荷、业务扩展计划、电网故障、工作票、操作票、运行方式调整计划和气象等多种数据源开展配电网负荷均衡重构研究，并在大数据平台上实现了在



朱翀霄/高级工程师

关键词/Keywords

配电网·
负荷均衡·
调度·
运维检修·
大数据·

线应用,为配电网调度和运维检修辅助决策提供了重要支撑。

1 馈线重过载量化模型及优化目标

1.1 馈线重过载量化模型

根据木桶原理,馈线载流量大小由导线材料、半径和馈线中载流量最小的线段以及环境温度等因素所决定。一般情况下,若环境温度变化不大,馈线载流量是一个近似固定值,将这一近似固定值作为载限值 R_0 ,把70%的载流量作为重载限值 R_h 。由于馈线重过载严重度与重过载时间、负荷幅值等有关,为了准确表达重过载严重度,给出具体的模型定义,如下所示。

假设馈线选定时间段 $[t_1, t_2]$ 内的负载率曲线为 $R(t)$,则馈线重过载成分曲线 $O(t)$ 的计算模型为

$$O(t)=\begin{cases} R(t)-R_h & R(t)>R_h \\ 0 & R(t)\leq R_h \end{cases}$$

当重过载幅值较高时,重过载严重度也会较高,相对应的 $O(t)$ 也会发生相应的变化,基于此提出重过载修正成分曲线 $F(t)$ 的计算模型,具体为

$$F(t)=\begin{cases} e^{O(t)} & 0\leq O(t)<2 \\ e^2 & O(t)\geq 2 \end{cases}$$

假设负荷幅值超过阈值,其过载严重度不变。其中,阈值设定为2。此时,对 $F(t)$ 在选定时间段 $[t_1, t_2]$ 内积分除以时间间隔(按分钟计算),就可以得到该时间段内的馈线负荷重过载指数ID X 的计算模型,具体为 $IDX=\frac{\int_{t_1}^{t_2} F(t)dt}{(t_2-t_1)}$ 。当ID X 值较大时,馈线负荷重过载严重度也较大。

1.2 优化目标与约束条件

对于某条需要进行优化的重过载馈线 Fd_0 ,假设其与网络中的其他 N 条馈线 $Fd_0\sim Fd_N$ 存在联络关系,从而形成了 N 个馈线偶,即 $Fd_1Fp1\sim Fd_N$ 。其中的每一个馈线偶都可以通过分段开关与联络开关的不同组合实现重构。在这里,假设有 $k(i)$ 种组合方式,在选定时间段 $[t_1, t_2]$ 内馈线两端重过载指数分别为 IDX_{ij1} 和 IDX_{ij2} ,提出优化目标函数模型,具体为

$$\min_{0\leq i\leq N}[\min_{0\leq j\leq N}(IDX_{ij1}+IDX_{ij2})]$$

利用该函数模进行优化时,还要考虑网络结构、电压、电流和潮流等因素,将这些作为约束条件。

2 配电网负荷均衡基础算法

2.1 算法概览

配电网负荷均衡基础算法主要分为如下4个步骤。

- 1) 根据相关规则构建待优化馈线列表。
- 2) 遍历待优化馈线列表,对于该列表中的每一条馈线执行负荷均衡优化算法。
- 3) 假设当前优化的馈线为 Fd ,将馈线 Fd 从列表中移出,从包含 Fd 的所有馈线偶中选出最适合的馈线偶 Fd_{opt} ,并针对该馈线偶调整联络开关位置,从而实现 Fd 的负荷均衡。
- 4) 馈线 Fd 调整后,利用公式重新计算 $Fd-c$ 的过载指数,并以计算结构为依据判断分析重过载与否。如果有重过载问题,则根据优化模型进行优化调整。为防止出现死循环,一条馈线加入待优化馈线的次数不能超过3次。

完成上述步骤后,检测待优化馈线列表是否为空,如果非空则继续执行步骤2,否则结束算法。算法的流程图如图1所示。在所有4个步骤中,步骤1和步骤3较为关键。步骤1在下面会进行专门阐述。步骤3复杂性较高:首先,需要对配电网拓扑进行分析从而找出所有包含 Fd 的馈线偶(假设有 N 条);接着,对这 N 条馈线偶并行开展优化试算,并对试算结果进行比较,选择重过载指数之和最小的馈线偶 Fd_{opt} 来进行负荷均衡调整。在下面将对如何针对单个馈线偶进行优化试算进行专门的介绍。

- 1) 步骤1:构建待优化馈线偶列表步骤。
- 2) 步骤2:遍历待优化列表,并获得当前馈线 Fd 待优化列表是否为空?
- 3) 步骤3:将 Fd 从列表移除,从包含 Fd 的所有馈线偶中选出最适合的馈线偶 Fd_{opt} ,并针对该馈线偶调整联络开关位置。

4) 步骤4: 对Fd及其对端馈线进行重过载计算, 并更新待优化列表。列表结束对配电网进行拓扑分析, 找出所有包含Fd的馈线偶(假设有 N 条), 对各组馈线偶进行优化, 并进行重过载指数试算。对试算结果进行比较, 选择重过载指数之和最小的馈线偶Fd_opt, 针对馈线偶Fd_opt进行负荷均衡优化调整。

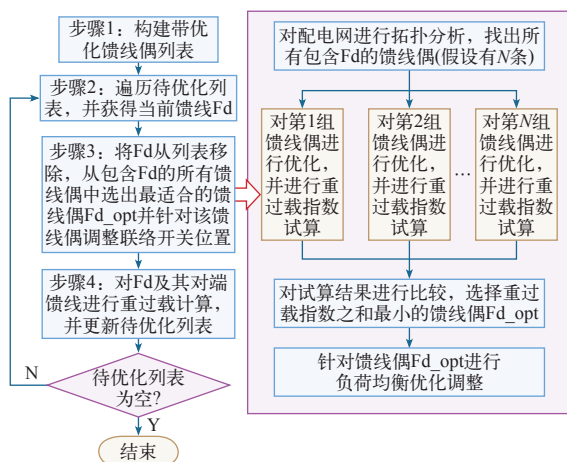


图1 配电网负荷均衡基础算法流程图

2.2 待优化馈线列表构建

从理论上讲, 无论馈线是否重过载, 都可以加入待优化馈线列表。但是实际上, 由于人力、物力等方面的限制, 加之考虑到系统稳定需求, 对所有馈线进行优化重构不太现实。因此实际工作中要重点优化“卡脖子”馈线, 突出重点, 可提高工作成效。那么, 怎么分辨什么样的馈线是“卡脖子”馈线呢? 下面提出了几种馈线加入待优化列表的规则, 为选择待优化馈线提供借鉴。

根据负载率定制规则, 具体为

$$(R_{\text{avg}} > R_{\text{th_avg}}) \vee \wedge (R_{\text{max}} > R_{\text{th_max}})$$

式中, R_{avg} 为馈线负载率的平均值, $R_{\text{th_avg}}$ 为与之相对应的阈值; R_{max} 为馈线负载率的最大值, $R_{\text{th_max}}$ 为与之相对应的阈值。

根据重过载时长定制规则, 具体为

$$\left(\frac{T_h}{T_{\text{total}}} > r_h \right) \vee \left(\frac{T'_h}{T_{\text{total}}} > r'_h \right)$$

式中, T_{total} 为总时长; T_h 为累计的重过载时长值, r_h 为与之相对应的比例阈值; T'_h 为重过载超过一定

预定义时长的累计时长值, r'_h 为与之相对应的比例阈值。

根据重过载指数定制规则, 具体为

$$\text{IDX} > \text{IDX}_{\text{th}}$$

式中, IDX_{th} 为馈线负荷重过载指数相对应的阈值。

2.3 单馈线偶优化试算

用热馈线代表负荷较重的待优化馈线偶; 用冷馈线代表负荷较轻的馈线。为了降低热馈线的重荷载问题, 将热馈线上的联络开关位置向出口断路器一侧移动, 使热馈线上的一部分负荷转移到冷馈线上, 实现拓扑结构优化。

图2为一个简化后的馈线偶拓扑结构, 相邻两个联络开关或两个分段开关之间的配电变压器负荷都可以合并成一个负荷分支。这里假设热馈线原有 n 个负荷分支, 联络开关的转移位置就有 $n-1$ 个。

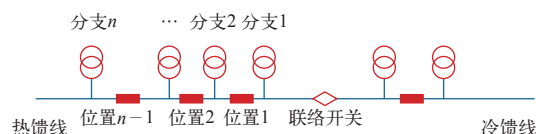


图2 馈线偶拓扑结构

相关变量定义如表1所示。

表1 相关变量的定义

变量	定义
$P_{\text{HOT}_0}(t)$	热馈线原始负荷曲线
$P_{\text{HOT}_i}(t)$	当联络开关置换到位置 i 时热馈线的负荷曲线
$P_{\text{COLD}_i}(t)$	当联络开关置换到位置 i 时冷馈线的负荷曲线
$\text{IDX}_{\text{HOT}_i}$	当联络开关置换到位置 i 时热馈线的重过载指数
$\text{IDX}_{\text{COLD}_i}$	当联络开关置换到位置 i 时冷馈线的重过载指数
$P_{\text{BRA}_i}(t)$	热馈线第 i 个分支的负荷曲线

表1对相关的变量进行了定义。当联络开关置换的位置 k 时, 原热馈线第 $1 \sim k$ 个负荷分支都转移到了冷馈线上。因此, 在这种运行方式下, 热馈线和冷馈线的负荷曲线变化为

$$P_{\text{HOT}_k}(t) = P_{\text{HOT}_0}(t) - \sum_{i=1}^k P_{\text{BRA}_i}(t)$$

$$P_{\text{COLD}_k}(t) = P_{\text{COLD}_0}(t) + \sum_{i=1}^k P_{\text{BRA}_i}(t)$$

当满足如下等式时, 位置 k 即为本馈线偶的联络开关最佳置换调整方案。

$$\begin{aligned} & \text{IDX_HOT}_k + \text{IDX_COLD}_k \\ &= \min_{0 \leq i \leq N} (\text{IDX_HOT}_i + \text{IDX_COLD}_i) \end{aligned}$$

3 算例分析

以某10 kV三馈线系统为例,用该算法进行了应用实践,以验证配电网负荷均衡算法的可行性、有效性。本10 kV三馈线系统如图3所示,有12个分段开关,3个联络开关,103台配电变压器。从图3中可以看出, a、b馈线来自同一个变电站,即110 kV变电站I, c馈线来自另一个110 kV变电站II。CB4联络开关与ac馈线偶相联络, CB8联络开关与ab馈线偶相联络, CB13联络开关与bc馈线偶相联络。

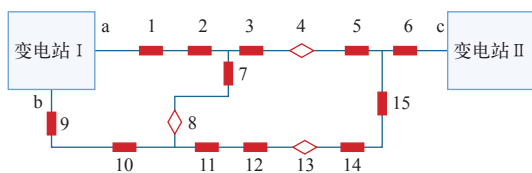


图3 三馈线系统原始拓扑结构

选定2015年迎峰度夏期间某典型日的馈线负荷为研究对象,所有配电变压器负荷数据都来自于信息采集系统,其中馈线负荷数据来自于D5000。连续数据采样15 min。结合这些原始数据绘制三条馈线的负荷曲线,如图4所示。本系统馈线实际额定电流为600 A,利用负荷重过载计算模型对三条馈线的重过载指数进行计算,可得a为3 520 000, b为0, c为7 600。而馈线重过载指数阈值定义为20 000, a馈线的重过载超过这一数值,加入待优化馈线偶列表,然后对其进行优化调整,具体过程如下。

首先,分析配电网拓扑结构,清楚掌握a馈线相对应的a&b馈线偶、a&c馈线偶的具体情况,并对它们进行简化,分别如图5、图6所示。

其次,对a&b馈线偶进行优化调整时,先将CB8联络开关合上,再依次打开CB7、CB2和CB1,然后计算两侧馈线的负荷重过载指数,其结果如表2所示。根据计算结果,当CB2作为联络开关时,两侧馈线的负荷重过载指数的和为最小值。

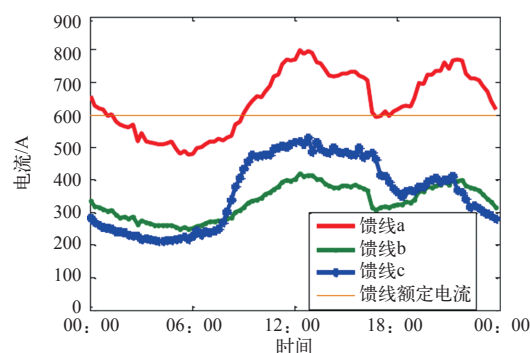


图4 三条馈线原始负荷曲线

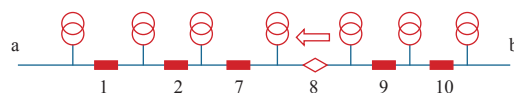


图5 简化的馈线偶a&b拓扑结构

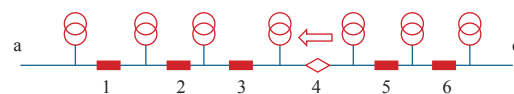


图6 简化的馈线偶a&c拓扑结构

表2 联络开关处于不同位置时馈线偶a&b的重过载指数

Tie switch pos	IDX_a	IDX_b	IDX_a + IDX_b
8 (原始位置)	3 520 000	0	3 520 000
7	853 000	0	853 000
2 (建议位置)	0	934 000	934 000
1	0	3 752 000	3 752 000

再次,对a&c馈线偶进行优化调整时,依然按照上述步骤操作,依次打开CB36、CB5、CB34和CB3,其结果如表3所示。根据计算结果,当CB3作为联络开关时,两侧馈线的负荷重过载指数的和为最小值。

表3 联络开关处于不同位置时馈线偶a&c的重过载指数

Tie switch pos	IDX_a	IDX_c	IDX_a + IDX_c
4 (原始位置)	3 000 000	7 600	3 007 600
3 (建议位置)	0	582 000	582 000
2	0	1 189 000	1 189 000
1	0	2 965 000	2 965 000

最后,对a&b馈线偶和a&c馈线偶的优化调整方案进行对比分析,发现馈线偶a&c的开关CB3与CB4的分合状态置换后可以得到最小值的负荷重过载指数。

因此,按照这一方案对a馈线进行优化调整,

(下转第49页)

- 多时间尺度协调优化调度[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 7-14, 55.
- [2] 吕颖, 鲁广明, 杨军峰, 等. 智能电网调度控制系统的安全校核服务及实用化关键技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 171-176.
- [3] 刘方, 杨秀, 时珊珊, 等. 不同时间尺度下基于混合储能调度的微网能量优化[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3079-3087.
- [4] 黄杨, 胡伟, 闵勇, 等. 考虑日前计划的风储联合系统多目标协调调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4743-4751.
- [5] 丁涛, 郭庆来, 柏瑞, 等. 考虑风电不确定性的区间经济调度模型及空间分支定界法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3707-3714.
- [6] 赵波, 薛美东, 陈荣柱, 等. 高可再生能源渗透率下考虑预测误差的微电网经济调度模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 1-8.
- [7] 王江波, 费标青, 王越, 等. 户用微电网能量调度日前计划研究[J]. 电测与仪表, 2013, 50(8): 81-86, 107.
- [8] 田晓龙. 特性各异电源多目标协同优化调度系统研究[J]. 东北电力技术, 2013, 34(5): 44-48.
- [9] 李明节. 基于国际先进技术的风电调度研究与实践[J]. 中国电力, 2012, 45(11): 1-6.
- [10] 刘方, 张粒子. 考虑日前调峰分配和流量波动平抑的梯级水电双层优化调度[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 799-807.

(收稿日期: 2017-10-21) EA

(上接第21页)

其所对应的负荷重过载指数小于20 000。但是此时从馈线的负荷重过载指数超过阈值, 需对其进行负荷调整。按照以上步骤确定c馈线的优化方案为b&c的开关CB13与CB14的分合状态进行置换。图7和图8分别展示了优化后的三馈线系统拓扑结构及负荷曲线, 可以看出馈线重过载问题得到了有效的缓解。

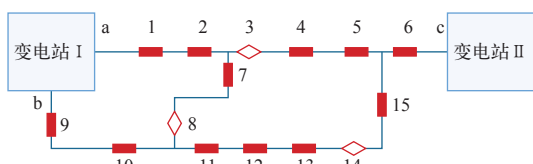


图7 三馈线系统优化后的拓扑结构

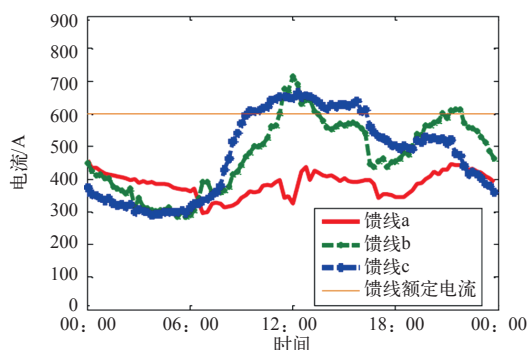


图8 三馈线优化后的负荷曲线

4 结束语

本文提出了一种基于过载时长及幅值的量化模型, 通过调整馈线间的联络开关与分段开关位置实现负载的均衡。利用大数据的方法构造负荷数据集来适应不同的应用场景, 从而有效降低了配电网故障的发生率, 为当地配电网调度与运行检修辅助决策提供理论依据。

参考文献

- [1] 李飞, 邱正美, 马丽, 等. 配电网重构算法综述[J]. 电网与清洁能源, 2011(12): 76-80.
- [2] 韩学军, 陈鹏, 国新凤, 等. 基于潮流计算的配电网重构方法[J]. 电网技术, 2007(17): 60-63.
- [3] 陈方亚. 对配电网重构算法的分析[J]. 广东科技, 2008(22): 141-142.
- [4] 陈根军, 王磊, 唐国庆. 基于蚁群最优的配电网重构算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001(2): 48-53.
- [5] 熊虎岗, 龚乐年, 刘海涛. 变结构耗散网络中负荷均衡优化改进算法[J]. 电力系统自动化, 2002(17): 49-53.

(收稿日期: 2017-11-09) EA