

[控制系统]

中压配电网无功优化算法综述

文/安徽省电力公司安庆供电公司 何世龙 汪李来 何怡燕 胡中鲲 莫平生

通过对中压配电网的无功优化系统的分析并实施系统改造,可以起到改善供电电能质量、提高电压合格率、减少负载总电流及电压降、改善三相不对称状况及及时消除谐波的功能。对配电网无功优化算法及优缺点做了全面的介绍。

电力系统的无功优化问题是一个多变量、多约束的混合非线性规划问题,其控制变量既有连续变量(如发电机节点电压和无功出力),又有离散变量(如有载调压分接头档位、补偿电容、电抗器的投切组数),使得优化过程十分复杂。电力系统无功优化问题的特点是:离散性、非线性、大规模、收敛性依赖于初值。因此,无功优化问题可能存在多解的情况。并且,电力系统无功优化问题的约束条件大部分为非线性。

配电网无功运行优化问题是一个大规模非线性整数规划问题。其目标函数通常为网损最小,也有采用偏移量最小,控制设备调节量最小或操作设备次数最少等作为目标函数。其等约束条件一般为各节点功率平衡,不等约束条件包括节点电压、线路功率和各控制量调压范围的限制。其算法主要有经典优化算法,人工智能算法等。

非线性规划法

由于无功优化规划问题自身的非线性,所以非线性规划法最先被用到电力系统无功优化规划中。非线性规划方法是采用非线性的目标函数并以相关等式和不等式为约束方程,该类型问题的求解方法是通过拉格朗日乘子或罚函数将约束并入目标函数中,并通过某种优化技术来求解这个最小化的增广目标函数。有学者应用拉格朗日乘子法和梯度法对有功电源和无功电源的优化规划问题进行了研究。也有学者把普通的系统潮流与系统的经济运行结合起来,并用库恩-塔克条件来求得非线性的投资费用与系统网损最小的无功配置方案。非线性规划是处理无功优化规划最直接的方法,这种方法的数学模型建立比较直观,物理

概念清晰,计算精度较高。但是现有算法不同程度存在计算量大、内存需求量大、收敛性差、稳定性不好以及对不等式的处理存在一定困难等问题,其应用受到了一定限制。

非线性规划法客观地描述了电力系统无功优化补偿的数学模型,并且原理也比较简单明确。但是对于离散变量采用了连续化的近似,使得计算结果有一定的误差,同时,非线性规划算法中求导、求逆运算多,占用内存多,使得解题规模受到了一定限制,对不等式约束处理上也有困难,因此限制了实际系统的应用。

线性规划法

与非线性规划相比,线性规划法理论成熟,收敛可靠,计算速度较快,对各种约束条件的处理简单。无功优化规划虽然是一个非线性问题,但可以对其线性化之后进行研究,找到一种有效的线性化建模方法,使该线性模型能够较为准确地反映原非线性无功优化规划问题,并用有效的线性规划求解方法求解,得到优化结果的精度就可以满足工程实际需要。利用线性规划法求解无功优化规划问题正是本着这种思想提出并加以实施的。由于线性规划的诸多优点,使之成为迄今为止发展最为成熟的一种无功优化规划方法。无功优化规划问题中包含着运行和投资两种不同的变量和约束,两者相互影响,根据各自特点,应用某些优化分解技术,有利于降低计算维数,提高计算速度。

但是,线性规划方法也有两个方面的不足。第一,它往往无法得到优化的全局最优解。无功优化补偿问题的算法是沿单路径搜索寻优,所以往往会收敛于一个局部极小值。除非初始点就在

全局最优解附近,才有达到全局最优解的可能。但很显然这是没有保障的。第二,它无法解决离散变量问题。对于无功优化补偿过程中的大量离散变量,线性优化方法采用了离散变量连续化的近似处理,但是无论连续有多么精确,总是无法达到离散变量实际值;再加上目前使用的无功补偿装置单组容量越来越大,这种近似处理带来的实际误差是非常惊人的。由于以上原因,使得该方法无法满足电力系统的实际需要,所以近年来单独讨论运用线性优化法解决无功优化补偿问题的研究文献已经较少了。

混合整数规划法

国外学者K. Hoki用改进的混合整数规划法有效处理了优化计算中变量的离散性问题。用该方法获得可行解,然后以逼近方法加以改进,最后逐次选择两个整数变量分析,在满足约束条件的情况下,进一步减少补偿点与补偿费用。混合整数规划优化算法的弊端在于计算时间属于非多项式类型,随着维数的增加,计算时间会急剧增加,有时甚至是爆炸性的。既精确地处理整数变量以解决问题的离散性,又适应系统规模而使其更加实用化,是这一方法的主要发展方向。传统数学优化方法依赖于精确的数学模型,但精确的数学模型较复杂,计算时间较长且求解比较困难,而粗略的数学模型又存在较大误差。

动态规划法

动态规划法是研究多阶段决策过程最优解的一种有效方法。动态规划法的核心是由美国数学家贝尔曼等人提出的贝尔曼最优化原理。它按时间或空间顺序,将问题分解为若干互相联系的阶段,依次对它每一阶段作出决策,最后获得整个过程的最优解。从前面介绍可知,线性规划和非线性规划要求它的目标函数和约束条件必须严格遵守线性和凸性,如果不满足这些条件,就可能求不出可行解,或求得的解只是局部最优解。而动态规划对目标函数和约束条件没有严格限制,所得的最优解也常常是全局最优解。其次,对于变量比较多、题目比较大的静态问题,用多阶段决策过程来求解比较容易,计算步骤也比较清楚。但动态规划法也存在缺陷。首先是“维数灾”问题,当研究问题的状态变量个数太多时,需要的计算工作量和计算机的存储量随维数的增多而猛烈增加,有时使解题困难或无

法进行;其次这种方法不存在标准的数学构成,要正确地构成一个实际问题的动态数学规划模型,常常比计算还困难,并且所得出的函数方程必须根据问题的不同性质结合其他数学技巧来求解,这就限制了它的推广使用。

人工智能方法

包括人工神经网络法、专家系统、模糊优化法和现代启发式搜索算法等。现代启发式搜索算法中的Tabu搜索、模拟退火算法、遗传算法等在电力系统无功优化中的应用已取得了大量的研究成果。

以上各种算法是在不同的电网模型下提出的不同的优化算法,这些算法都要对电网进行不同的处理,和实际电网有一定的差距。目前研究人员不断深入研究并完善这些算法,克服其在具体应用中的不足,在不断改进各种算法过程中,把这些算法结合起来使用,充分发挥各自的长处,开发出更全面可靠、计算效率更高的综合算法是目前研究的一个趋势。

双向遍历算法

对于中压配电线路来说,补偿点是安装配电线路补偿的位置,是线路上的一个或多个节点,由于节点数量的限制,在单点补偿模式中,补偿点的可能位置为 N ;在两点补偿模式中,补偿点的可选择组合的数量可能较大,但它是一个有穷数组,可以逐一代入补偿容量计算,在所有结果中寻找最优解,通过算法的简化,计算量可以大大减少,使得纵向遍历计算成为可能。补偿点位置的变化必将带来各补偿点最优补偿容量的变化,要想求得最优的补偿效果还必须考虑补偿容量的变化,因此对传统的遍历算法增加了横向遍历,在每一个补偿点位置上都对合理可能的补偿容量进行遍历计算,选取最优补偿容量配置作为该补偿位置的纵向遍历计算结果。

首先对两点补偿方式进行分析,对于一个有 N 个节点的配电线路,在两点补偿模式下线路的无功电源来自以下三个方面:线路0节点的补偿容量 Q_{b0} ,补偿节点 n_1 的补偿容量 Q_{b1} 和补偿节点 n_2 的补偿容量 Q_{b2} 。假设 Q_{b0} 的容量为 Q_s ,线路的无功缺额由 $Q_{b1} + Q_{b2}$ 提供。

对于节点 n_1 和 n_2 位置的确定,假设第一个补偿点 n_1 在节点1,补偿的初始容量为 Q_s ,第二个补偿点 n_2 由节点2向节点 N 作纵向遍历,这个移动过程即为一

个定补偿点 n_1 在1节点, 动补偿点 n_2 由2节点向 N 节点进行纵向遍历的单补偿点计算过程。以 Q_s 为补偿增加 n_1 补偿容量, 重复将 n_2 由节点2向节点 N 的纵向遍历过程, 直至 n_1 的补偿容量和0节点的补偿容量加上 Q_s 后, 满足线路的无功需求位置。在这个过程中实际上是调用了 $N-1$ 次单点补偿计算过程。经过 $N-1$ 次计算后, 找到使得整条线路有功损耗最小的补偿点 n_2 及其补偿容量, 将此点定为 n_{12} 点。

在确定了 n_{12} 点以后, 确定其补偿的起始容量为 Q_s , 我们对补偿点 n_1 进行节点1至节点 $n_{12}-1$ 的纵向遍历计算, 实际上就是定补偿点在 n_{12} 节点, 动补偿点由1节点移动到 $n_{12}-1$ 节点的单补偿点计算过程。以 Q_s 为补偿增加 n_2 补偿容量, 重复将 n_1 由节点1至节点 $n_{12}-1$ 的纵向便利计算, 直至 n_2 的补偿容量和0节点的补偿容量加上 Q_s 后, 满足线路无功需求为止。进行以上若干次计算后, 找到使得整条线路有功损耗最小的补偿点 n_1 及其补偿容量, 将此点定位 n_{11} 点。

第一个补偿点 n_{11} 确定后, 再对第二个补偿点 n_{12} 进行纵向遍历计算, 由于在上次移动过程中第一个补偿点 n_{11} 的位置是在节点1到节点 n_{12} 之间产生的, 位置较1节点后移了, 它的后移使得第二个补偿点 n_{12} 位置较理想位置靠前了, 因此其遍历计算范

围是 n_{12} 至 N , 重复进行双向遍历计算, 得出新的补偿点二的位置 n_{22} 点。将补偿点 n_{22} 固定, 再次对 n_{11} 进行双向遍历计算, 得出新的第一个补偿点位置 n_{12} 点, 以此类推, 进行数次循环计算后, 可使 n_{k1} 与 $n_{k1}+1$ 或 n_{k2} 与 $n_{k2}+1$ 的位置不再发生变化。此时的两个补偿点的位置及对应的补偿容量即为 Q_{b0} 在 Q_s 容量下的线路最佳补偿点和最佳容量配置。

以 Q_s 为步长增加 Q_{b0} 的容量, 没增加一次 Q_{b0} 的容量, 重复以上三步过程, 直至 Q_{b0} 容量加上 $2Q_s$ 后满足线路的无功需求为止, 完成了两个补偿点的双向遍历过程, 使得线路有功损耗最小的配置即为两点补偿下的最优补偿方案。

结束语

在电力市场的模式下, 电力公司的运行管理在满足电能质量的前提下追求经济效益的最大化, 进行配电线路分段无功补偿的各项投资希望能够通过降低线路损耗来提供, 甚至获得经济收益, 因此要求无功补偿的配置算法越精确越好, 这样可以获得经济效益最好的方案。为此以后的研究方向及重点应该放在补偿点位置与容量配置综合考虑的补偿算法, 以克服经验算法的不足。EA

(收稿日期: 2015.05.08)

(编辑: 杨得润)

(上接第57页)

(1) 拆除定子线棒, 做铁损试验, 根据铁心实际情况拆除铁心主冲片段数, 并对铁心磨损轻微部位进行修复处理。

(2) 更换定子线棒层间测温元件及损坏的测温引线。

(3) 根据定子线棒受损情况更换线棒;

(4) 对发电机引出线瓷瓶密封垫进行更换。

处理过程总结

在处理#2发电机定子铁心故障过程中, 更换了发电机励侧1-3段硅钢片, 又更换了试验不合格的8根上层线棒。

在2011年7月17日我们完成了对#2发电机定子铁心故障的处理工作, 比预计提前3天。这是个时间紧、任务重的大工程, 能顺利地提前完成, 主要得益于各方面的重视和全力配合。当然在故障处理过程中, 也存在一些不足, 下面做以简单的总结。

(1) 在定子铁心硅钢片叠片完成回压阶段, 由于厂家设备问题, 影响工期1~2天时间。

(2) 在定子线圈进行内冷水系统查漏过程中, 由于增加气密试验检查, 影响工期2~3天时间。

(3) 在定子线圈手包绝缘过程中, 因包扎层数不够、树脂配比不合格, 施工返工影响工期1天时间。

建议和预防措施

(1) 发电机A检时, 应做发电机定子铁心铁损EL-CID试验, 以便及时发现铁心硅钢片的短路点, 检查铁心的松紧度(使用铁心测量刀测量: 即20 kgf其刀头插入深度不大于3 mm为合格)。

(2) 发电机A检时, 应做发电机定子端部模态试验, 防止共振发生。

(3) 应尽量采取控制措施, 避免向发电机内部漏油, 漏油可使发电机定子铁心松动加剧。

(4) 发电机小修时, 应从励侧底部人孔门进入发电机内部, 用窥视镜观察发电机端部情况, 检查有无油污等异常, 以便发现定子铁心松动、过热等问题。EA

(收稿日期: 2015.03.01)

(编辑: 白文亭)