

电力系统有功安全校正策略的反向等量配对调整法

邓佑满* 黎辉** 张伯明* 洪军** 雷健生*

(* 清华大学电机系 100084 北京) (** 东北电力集团公司 110006 沈阳)

摘要 有功安全校正策略用于有意识地调整电力系统的运行方式,使之运行更安全,主要用于消除支路及联络线族的过载。分析了灵敏度的物理意义,并从中得出变换平衡机时灵敏度的变换公式。为消除某支路的有功过载,在灵敏度计算的基础上,由正灵敏度的机组和负灵敏度的机组的反向等量调整来得到一个系统有功功率始终平衡的控制策略,该策略能保证调整量最小,因而具有很好的实用性。已在东北电网的EMS中投入实际应用,结果表明,该算法提供的校正措施切实可行且有效,算法无收敛性问题,鲁棒性强。

关键词 电力系统 有功安全校正 灵敏度 能量管理系统

分类号 TM 732

0 引言

电力系统有功安全校正控制是安全控制的一项重要内容。当系统出现支路有功功率越限时,研究如何调整发电机有功功率使得过负荷解除,或者当调整功率不能消除越限时,给出切负荷的方案。当然,切负荷是迫不得已的事情,校正控制也要尽可能地保证对负荷的供电。安全校正算法有优化规划类算法^[1,2]和灵敏度类算法^[3]。优化规划类算法首先列出一个规划模型,包括优化目标和各种安全约束条件,然后用数学的方法求解该模型。优点是约束条件考虑全面,调整策略的安全性和经济性好;缺点是调整的设备可能太多,在电网调度实践中不太实用,且可能有计算收敛性问题。灵敏度类算法无需迭代,没有收敛性问题,容易实现调整量最小或调整设备最少的目标,便于操作实施。

安全校正策略计算的关键是要给出各个机组或负荷的调整量,而不仅仅是一个调整顺序。以前灵敏度类算法的一些研究工作过多地集中在如何计算灵敏度方面,而对如何计算调整量关注不够。最典型的求调整量的方法是按灵敏度绝对值大小的降序来依次求得调整量。由出力调整带来的功率不平衡量全部由平衡机承担,结果可能导致平衡机越限,调整方案最终不可行。例如,若计算结果中,绝对值大的灵敏度都是正值,对应正灵敏度的机组应减出力以消除越限。因此,可能排不上加出力的机组,调整就已经结束,所有减出力造成的功率缺额不得不全部由平衡机来承担,平衡机可能越上限。因而这一调整方

案实际不可行。另外,在实际的电网调度实践中,没有平衡机的概念,调度员最关心的是哪几台机组加多少出力,哪几台机组减多少出力,并保证调整后有功功率基本平衡。安全校正策略应符合这一点。

1 机组有功出力对支路有功的灵敏度

1.1 灵敏度的物理意义

当系统中机组 i 有功增加1个单位时,支路 L 有功潮流变化量就是机组 i 有功对支路 L 有功潮流的灵敏度 S_{Li} 。值得注意的是,机组 i 有功增加1个单位时,默认系统中的平衡机 H 有功减少1个单位(忽略网损的变化),以保证系统中有功功率的平衡。因而,上述灵敏度是机组 i 有功增加1个单位,平衡机 H 有功减少1个单位时支路 L 有功潮流的变化量,而不仅仅是机组 i 有功增加引起的支路潮流变化量。

在电网调度实践中,调度员在有意识地调整系统运行方式时,在指定加出力的机组及其功率增量的同时要指定减出力的机组及其功率减量,如A机组加50 MW,B机组减50 MW。一台机组加出力后系统出现功率余额,调度员不会让此余额任凭系统中的所有机组分摊掉。因此,由系统中的所有机组分摊功率余额的所谓准稳态灵敏度只适用于系统自行发生小扰动情况,而不适于调度员有意识地调整系统运行方式的情况。

在灵敏度计算中,指定平衡机组仍然是必要的。这里有两方面的原因。一是为了功率平衡,在负荷不变的情况下,系统中有加出力的机组就得有减出力的机组,且加减出力基本相等(忽略网损变化)以保持系统功率的平衡,反之亦然。按上段论述,调度员在调整运行方式时,用来平衡系统功率余额的机组

是调度员指定的,可以看做是指定平衡机。二是计算需要;没有平衡机,式(1)中的 B' 不可逆。

1.2 灵敏度计算

灵敏度的计算利用了快速分解法中的 B' 矩阵及直流潮流公式。

$$\begin{cases} B' \Delta \theta = \Delta P \\ \Delta P_L = \frac{\Delta \theta_L}{x_L} \\ S_{Li} = \frac{\Delta P_L}{\Delta P_i} \end{cases} \quad (1)$$

式中 L 是支路下标; i 是机组下标; x_L 是支路的电抗; ΔP 是一个单位矢量,只有第 i 个元素 (ΔP_i , 机组 i 的有功增量) 是 1, 其他元素为 0; ΔP_L 是支路 L 潮流的变化量; $\Delta \theta_L$ 是支路 L 两端的相位差。

由于指定了某机组做平衡机,从而保证 B' 可逆。

某机组 i 的有功出力调整到其上限或下限时可以消除支路 L 过载的能力定义为该机组的消除过载能力,计算公式为:

$$C_{Li} = \begin{cases} S_{Li}(P_i - P_{imax}) & S_{Li} < 0 \\ 0 & S_{Li} = 0 \\ S_{Li}(P_i - P_{imin}) & S_{Li} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中 P_{imax} 和 P_{imin} 分别为机组 i 的有功出力上限和下限。

1.3 平衡机转移及灵敏度变换

如图 1 所示的 3 台机组 A, B 和 C, 设机组 C 为平衡机, 忽略网损变化; 机组 A 加出力、机组 C 减出力对支路 L 的灵敏度为 S_{LA} ; 机组 B 加出力、机组 C 减出力对支路 L 的灵敏度为 S_{LB} , 也就是机组 B 减出力、机组 C 加出力对支路 L 的灵敏度为 $-S_{LB}$ 。

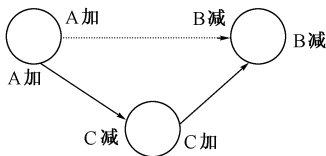


图 1 机组加减出力的转移

Fig. 1 Relation of power transferring

若加减出力都是 1 个单位, 则加 A 减 C 且加 C 减 B 的总效果等价于加 A 减 B。或者说, 以机组 C 为平衡机的灵敏度之差 $S_{LA} - S_{LB}$ 等价于以机组 B 为平衡机的机组 A 的灵敏度。即:

$$S_{LA}|_{B=H} = S_{LA}|_{C=H} - S_{LB}|_{C=H} \quad (3)$$

式中 下标 $C=H$ 表示选机组 C 为平衡机, 其余同。

这一结论有重要意义, 它表明: 在指定平衡机 C 条件下计算出各机组对支路 L 的灵敏度后, 若要计

算任一其他机组 B 为平衡机时机组对支路 L 的新的灵敏度, 只要将原灵敏度减去机组 B 的灵敏度即可。以 B 为平衡机的 A 的灵敏度等于以 A 为平衡机的 B 的灵敏度的相反数。且由式(3)可知, 平衡机的灵敏度为零。

2 安全校正控制模型

设某线路的有功越限量为 ΔP_L , 机组有功出力调整对该线路有功的灵敏度矢量为 S , 将该矢量分为 3 个子矢量。 S^+ 包括全部正的灵敏度分量, 相应的机组集合为 G_{plus} ; S^- 包括全部负的灵敏度分量, 相应的机组集合为 G_{minus} ; S^0 包括全部为零的灵敏度分量, 相应的机组集合为 G_{zero} 。将集合 G_{plus} 和 G_{minus} 中的机组按下述原则排序: 依灵敏度绝对值的大小按降序排列; 当 2 个分量绝对值的大小相同时, 依相应的消除过载的能力按降序排列。

将集合 G_{zero} 中的机组按下述原则排 2 个序: 加出力的排序, 按可加出力 (出力上限 - 当前出力) 的大小降序排列; 减出力的排序, 按可减出力 (当前出力 - 出力下限) 的大小降序排列。

为尽快消除越限, 也就是以最小的调整量来消除过载, 灵敏度为负的机组应该加出力 ΔP_j^+ , 灵敏度为正的机组应该减出力 ΔP_i^- , 灵敏度为零的机组调整出力 ΔP_z 用于平衡有功功率。调整量 ΔP_j^+ 和 ΔP_i^- 应满足如下优化目标函数和约束条件:

$$\min \sum_{i \in G_{plus}} \Delta P_i^- + \sum_{j \in G_{minus}} \Delta P_j^+ + \sum_{z \in G_{zero}} |\Delta P_z| \quad (4)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i \in G_{plus}} S_i^+ \Delta P_i^- - \sum_{j \in G_{minus}} S_j^- \Delta P_j^+ = \Delta P_L \quad (5)$$

$$\sum_{j \in G_{minus}} \Delta P_j^+ - \sum_{i \in G_{plus}} \Delta P_i^- + \sum_{z \in G_{zero}} \Delta P_z = 0 \quad (6)$$

$$\Delta P_i^-, \Delta P_j^+, \Delta P_L > 0, i \in G_{plus}, j \in G_{minus} \quad (7)$$

$$S_i^+ > 0, S_j^- < 0, i \in G_{plus}, j \in G_{minus} \quad (8)$$

式(4)表示以调整量最小作为目标函数; 式(5)表示通过调整机组出力刚好消除支路越限; 式(6)表示加减出力时保持功率平衡。只有在调整机组无法消除过载时才切负荷, 且切负荷措施等价于加机组出力, 所以为了简化问题表述, 未考虑负荷调整。

3 安全校正策略的反向等量配对调整法

按灵敏度大小调整机组出力不是什么新内容。问题在于, 若将所有机组灵敏度的绝对值大小按降序排列, 并按此顺序调整出力, 则很有可能不能保证系统的功率平衡。在一个算例中, 可能是以正的灵敏度为主, 而另一个算例又可能反之。按这种方案调整, 功率的不平衡量只能靠平衡机组来承担, 其结果

往往不合理。本文将给出新的调整原则,即反向等量配对调整原则,以保证系统功率平衡及调整量最小。反向等量配对调整的含义为:为每一加出力的机组都找到一个与之配对的减出力的机组,反之亦然;每一配对机组加减出力的值相等。

3.1 反向等量配对调整原则

从式(5)看出,在调整量 ΔP_j^+ 和 ΔP_i^- 的值一定的情况下,灵敏度越大,可以消除的支路过载量越大。或者说,在消除过载量 ΔP_L 一定的情况下,先调灵敏度最大的机组,则所需的调整量最小。实际调整时遵循以下原则。

- a. 加出力时从负灵敏度中绝对值最大机组加起,减出力时从正灵敏度中绝对值最大机组减起。
- b. 反向等量配对调整:每一个加出力的机组 A 都有一个减出力的机组 B 与其配对,且其调整量的绝对值相等。在一次配对调整过程中,调整量是下述三者的最小量:机组 A 的可加量, B 的可减量,以及为消除过载需要的调整量,如式(11)所示;配对调整后要修正机组的可调量及支路的过载量。
- c. 一台机组可与多台机组进行顺序配对调整。
- d. 当集合 G_{plus} 中机组没有减出力的能力时,集合 G_{zero} 中的机组可以减出力。
- e. 当集合 G_{minus} 中机组没有加出力的能力时,集合 G_{zero} 中的机组可以加出力。
- f. 当集合 G_{plus} 中机组可减出力的能力强,集合 G_{minus} 和 G_{zero} 中的机组加出力达上限也不足以平衡系统有功时,可切负荷。
- g. 直到支路的过载量为零时调整结束。

3.2 反向等量配对调整计算

设待加机组(集合 G_{minus} 或 G_{zero} 中机组)为 A,待减机组(集合 G_{plus} 或 G_{zero} 中机组)为 B。A, B 不能同时是 G_{zero} 集合中的机组。A 的灵敏度 $S_{LA} \leq 0$, B 的灵敏度 $S_{LB} \geq 0$ 。等量的加 A 减 B 相当于将 B 看成是平衡机,此时 A 对支路 L 的潮流的灵敏度为:

$$S_{LA}' = S_{LA} - S_{LB} \tag{9}$$

因为 A, B 不能同时为 G_{zero} 集合中的机组,因而式(9) 小于零。若支路的过载量为 ΔP_L , 则 A, B 的调整量应为:

$$\Delta P_A' = - \frac{\Delta P_L}{S_{LA}'} = \frac{\Delta P_L}{S_{LB} - S_{LA}} = \Delta P_B' \tag{10}$$

实际上, A, B 的调整量受 A 的可加量 ΔP_A^{max} 和 B 的可减量 ΔP_B^{max} 限制,实际调整量为:

$$\Delta P_A = \min \left\{ \frac{\Delta P_L}{S_{LB} - S_{LA}}, \Delta P_A^{max}, \Delta P_B^{max} \right\} = \Delta P_B \tag{11}$$

求出 $\Delta P_A, \Delta P_B$ 后,修正 A 的可加量、B 的可减量及支路越限量。经过一次配对调整,若支路的越限尚未消除,则 A, B 中必有一个达限值者不能再调。不妨设 B 达下限不能再减,而 A 尚有加出力的余地,则 A 不变,在待减机组集合中按排序选下一个机组 B' 作为新的 B 机组,重复上述配对计算,直到支路的过载量为零时结束。

若 G_{plus} 和 G_{minus} 集合中都仅考虑 1 台机组,从式(5)也可得出式(10),且配对调整总满足式(6),因而,反向等量配对调整的结果就是模型式(4)~式(8)的解。

4 算例与结论

本文算法在东北电网的 EMS 中投入了实际应用,并通过了现场验收,为调度员调整系统运行方式提供了一个有用工具,用户非常满意。

1999 年 3 月 9 日,某调度员以实时断面为基础,在 EMS 中开断电浪线后给出的一个潮流断面,其中北耿线过载 106 MW。表 1 给出了校正这一过载的措施。可以看出,调整量满足“加出力=减出力”,系统功率自动平衡,无需平衡机承担功率缺额。

为了模拟东北大发水电时的运行方式,北部水电向辽南大连地区输送功率,4 回线的潮流之和达 508 MW,超过安全限值(300 MW),过载 208 MW。表 2 给出了校正这一过载的措施。

表 1 北耿线过载 106 MW 的校正措施
Table 1 Strategies for correcting overflow of transmission line Beigeng

措施	机组名	灵敏度 ¹⁾	消除过载能力/MW	当前有功出力/MW	上限(加) 下限(减)/MW	校正后出力/MW	调整量/ MW
加出力	鞍山 2 号	-1.199	1.6	96.4	110.0	110.0	13.6
加出力	桓仁 1 号	-1.158	14.0	102.0	222.5	222.5	120.5
加出力	回龙 1 号	-1.158	4.8	30.4	72.0	72.0	41.6
加出力	太哨 1 号	-1.108	5.5	34.6	84.0	65.0	30.4
减出力	丹东 2 号	4.010	64.9	336.8	175.0	175.0	161.8
减出力	丹东 1 号	4.010	28.1	245.1	175.0	200.8	44.3

注:1)灵敏度是每增加 10 MW 机组有功出力或负荷时被控制量北耿线有功潮流的变化量(MW)。

表 2 向大连送潮流断面(4 回线潮流之和)过载 208 MW 的校正措施
Table 2 Strategies for correcting overflow of tie line group Dalian 4 lines

措施	机组名 负荷名	灵敏度	消除过载 能力/MW	当前有功 出力/MW	上限(加) 下限(减)/MW	校正后 出力/MW	调整量/ MW
加出力	大连湾	-9.811	140.1	207.2	350.0	350.0	142.8
减出力	哈三 3 号	0.190	3.0	457.8	300.0	300.0	157.8
减出力	哈三 2 号	0.189	1.3	190.4	120.0	139.6	50.8
切负荷	大连三	9.811	72.6	74.0	0.0	6.8	65.8

由于大连地区只有大连湾 2 号机可以加出力，虽然可减出力的机组还很多，也必须切除大连地区的负荷，以保证功率平衡。若按灵敏度绝对值的大小排序，且先调机组出力，再切负荷的策略确定校正措施，其结果将是大量无效的减出力措施。表 2 中，“加出力+切负荷=减出力”，系统功率仍然平衡。

算例表明，该算法提供的校正措施切实可行、有效，在调整过程中，调整量最小，系统功率又保持平衡。算法计算快速、鲁棒性好。

参 考 文 献

1 白晓民,于尔铿,傅书逊,等.一种安全约束经济调度的广义网络流规划算法.中国电机工程学报,1992,12(3):66~72

2 朱文东,郝玉国,刘广一,等.应用线性规划方法的安全约束调度.中国电机工程学报,1994,14(4):57~64
3 邓佑满,张伯明,相年德,等.联络线族的有功安全校正控制.电力系统自动化,1994,18(6):47~51

邓佑满,男,1966 年生,博士,副教授,中国电机工程学会配电自动化分专委会委员,主要从事能量管理系统(EMS)和配电管理系统(DMS)的研究、开发和教学工作。

黎 辉,男,1962 年生,硕士,研究方向为经济调度、EMS 软件实用化设计与改进等。

张伯明,男,1948 年生,教授,博士生导师,发电教研组主任,IEEE 高级会员,中国电机工程学会自动化专委会委员,主要从事电力系统分析和调度自动化 EMS/DMS 的研究与教学工作。

ADJUSTMENT OF EQUAL AND OPPOSITE QUANTITIES IN PAIRS FOR STRATEGY OF ACTIVE POWER SECURITY CORRECTION OF POWER SYSTEMS

Deng Youman*, Li Hui**, Zhang Boming*, Hong Jun**, Lei Jiansheng*
(* Tsinghua University, 100084, Beijing, China)
(* * Northeast China Electric Power Corporation, 110006, Shenyang, China)

Abstract Strategy for active power security correction is aimed to adjust the operation mode of a power system and to get a more secure power system. It is mainly used to alleviate overload of transmission lines and tie line groups. The physical meaning of active generation sensitivity with respect to transmission line is analyzed and the transforming formula of sensitivity while changing slack generator is derived. Based on the sensitivity calculation, active generations with positive sensitivity and that with negative sensitivity are adjusted with opposite equal quantity in order to obtain a strategy with a balanced active power and minimum adjustment value. This approach has been implemented in the EMS of Northeast Power Network. It has been shown that this approach is practical, robust and valid.

Keywords power systems strategy for security correction sensitivity EMS

(上接第 4 页)

ANALYSIS ON THE EFFECTS OF SECONDARY VOLTAGE CONTROL BY SINGULAR DECOMPOSITION METHOD

Liu Feng, Yao Xiaoyin, Sun Yuanzhang (Tsinghua University, 100084, Beijing, China)

Abstract In this paper, the minimum singular value of the load flow Jacobian matrix is used as the comparative index of stability margin to analyze the effects of secondary voltage control (SVC) on the stability of a 2-generator system. The simulation and analysis are carried out on the conditions of load increment, earth faults, and small disturbances with a heavy load respectively. Simulation results show that secondary voltage control can enlarge the stability margin of a power system by increasing the minimum singular value of the load flow Jacobian matrix, and sequentially improve the stability of the power system by rearranging the reactive power in the whole region. It also shows that secondary voltage control is a feasible method to put off the voltage collapse in power systems.

Keywords power systems voltage stability secondary voltage control (SVC) minimum singular value