

# 电力稳定控制系统低频低压减载的最优策略实现

顿 敦, 许先华, 吴兆国

(北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 对电力稳定控制系统中母线低频低压减载这一运行故障处理的控制策略进行了分析。以 18 条运行负荷线路为例, 列出其最优策略数学模型。分别用穷举法、过切法、动态规划法加以实现, 比较各自运算过程、计算分析次数以及特点和不足。结果显示: 动态规划法相比于穷举法计算量少、计算结果丰富; 相比于过切法, 计算量没有大的增加且计算结果准确。

**关键词:** 稳定控制系统; 低频低压减载; 最优策略; 动态规划法

**中图分类号:** TM 761; TM 712

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2006)04-0028-03

## 1 问题描述

低频低压减载是一种常见的电力安全稳定控制方式<sup>[1]</sup>, 在稳定控制系统中, 当出现母线低频低压的运行故障时, 需要切除部分线路负荷以保证电力系统的安全稳定运行。稳定控制装置安装在电力系统运行现场, 实时采集运行现场运行母线电压, 并计算工作频率, 经过与预先设置的频率、电压数据表比较, 从而得出电力系统是否工作在正常状态, 当有低频低压现象时, 采取切除部分线路负荷使频率、电压恢复到正常工作状态, 以保证整个电力运行系统的安全稳定运行<sup>[2-3]①</sup>。

当有母线低频低压故障时, 稳定控制装置要根据运行策略执行出口措施, 一般有以下几种运行策略。

**a.** 切除固定线路: 当有故障发生时, 切除事先设置好的运行负荷线路。

**b.** 根据功率定值切除线路: 当有故障发生时, 根据策略表中预先计算好的功率定值, 切除运行负荷线路, 使切除的运行负荷线路的功率累加值大于功率定值。

对于策略 **a**, 可以看出并不能保证所切除的预先设定的固定线路功率在过负荷功率附近, 有可能比过负荷功率大得多, 也有可能比过负荷功率小得多。当比过负荷功率小得多时, 母线频率、电压不能恢复正常; 当比过负荷功率大得多时, 对电力运行系统也是不利的。因此, 这种运行策略不是最理想的。

对于策略 **b**, 可以看出当切除的负荷线路功率与功率定值相差不多时, 可以保证电力系统很快恢复到正常运行状态。这种方式所切除的负荷线路不是固定的, 而是由稳定控制器根据当前电力系统运行状态决定。

## 2 最优策略数学模型

为了使电力系统的母线从低频低压故障中尽快恢复正常, 期望所切除的负荷线路功率和尽可能接近过负荷功率。就根据功率定值切除运行负荷线路来讨论运行策略的实现。在此假定有 18 条运行负荷线路, 讨论切负荷线路功率和大于等于过负荷功率的情况。根据这一期望目标, 得出以下方程:

$$\sum_{i=1}^{18} (a_i P_i) - P_r \geq 0 \quad a_i \in [0, 1] \quad (1)$$

$$S = \min \left[ \sum_{i=1}^{18} (a_i P_i - P_r) \right] \quad a_i \in [0, 1] \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{18} P_i > P_r \quad (3)$$

其中,  $P_i$  是各条运行负荷线路功率,  $P_r$  是过负荷功率,  $S$  是 18 条线路中不重复的任取不大于 18 条线路的功率和大于过负荷功率的最小值。显然, 这是一个最优问题。

最优目标为: 从 18 条线路中任取不重复的线路负荷功率, 使其累加功率与所要求切除的负荷功率差值最小且累加功率大于所要求切除的负荷功率。

约束条件为: 18 条线路累加负荷功率值大于所要求切除的负荷功率。

## 3 最优策略实现分析

下面分别介绍此问题的 3 种实现方式。

### 3.1 穷举法

运算过程: 从 18 条线路中任取不重复的  $i$  条线路 ( $i = 1, \dots, 18$ ), 求共有  $C_{18}^i$  种组合的  $\text{sum}(P_i)$ , 取其中  $\min[\text{sum}(P_i) > P_r]$  最优组合。

① 北京四方继保自动化股份有限公司. CSS-100BE 低频低压减载说明书, 2004.

计算分析:

$$\text{组合比较次数 } n_C = \sum_{i=1}^{18} C_{18}^i = 310\ 762$$

$$\text{加法次数 } n_A = \sum_{i=1}^{18} (i-1)C_{18}^i = 2\ 472\ 259$$

特点:穷举法可以取到最优切负荷问题的最优组合,运算简单。

不足:运算时间过长。

### 3.2 过切法

运算过程:从 18 条线路中取 1 条最大功率线路的功率  $P_1$ 。若有  $P_1 \geq P_r$ ,则停止计算;否则,再取次大功率的线路功率  $P_2$ ,若有  $P_1 + P_2 \geq P_r$ ,则停止计算;否则,反复上述过程,直至  $\sum (P_i) \geq P_r (i=1, \dots, 18)$ 。

计算分析:

$$\text{最大比较次数 } n_C = \sum_{i=1}^{17} i = 153$$

$$\text{最大加法次数 } n_A = 17$$

特点:过切法运算速度快,运算简单。

不足:运算结果并不是最优组合,存在过切。

### 3.3 动态规划法

通过对穷举法与过切法的分析,可以看到,上述 2 种方法虽然运算简单,但穷举法运算量较大,当线路负荷较多时,计算时间不满足实时要求;过切法所得并不是此问题的最优解,不能最好地解决系统稳定运行问题。在此,使用动态规划法尝试求得在计算速度与计算结果均可满足要求的解。

动态规划法<sup>[4-6]</sup>具有如下性质:无论初始状态/初始决策如何,其余决策活动必须相对于初始决策产生的状态构成一个最优决策序列,使整个决策活动构成最优决策序列。

最短路线的函数基本方程为

$$\sum_{i=1}^{18} (a_i P_i) - P_r < 0 \quad a_i \in [0, 1] \quad (4)$$

$$\min[\text{abs}(\sum_{i=1}^{18} (a_i P_i - P_r))] \quad a_i \in [0, 1] \quad (5)$$

$$\min[\text{abs}(\sum_{i=1}^{18} (a_i P_i - P_r))] \geq 0 \quad a_i \in [0, 1] \quad (6)$$

运算过程:从终点开始,分别取 18 条线作为决策点,用式(4)(5)逆向求出倒数第 1 阶段到达终点的最短路线;式(6)是收敛条件,若满足则搜索收敛;反复叠代此过程直至搜索收敛或所有线路都已搜索;以 18 条线作为决策点,会得到 18 种最优组合结果,在这 18 种结果中得出的最优组合就是问题的最优组合结果。

计算分析:

$$\text{最小运算次数 } n = 35$$

$$\text{最大比较次数 } n_C = 16 \times 18 \times 18 = 5\ 184$$

$$\text{最大加法次数 } n_A = 18 \times 17 = 306$$

分别对穷举法与动态规划法由 C 语言编写仿真程序。

下面介绍动态规划法的仿真程序运行步骤。

a. InitRoutePowerAndRemovePower // 线路功率初始化;

b. SumPowerCheck // 所有线路功率和小于等于过负荷功率退出运行,动态规划法的约束条件检查;

c. StartOptimalRoute(lineNo) // 以线路 lineNo 为决策点计算最优组合;

d. 重复 c, 分别选取线路 1 到 18 作为决策点计算最优组合;

e. SelectOptimalRouteFromSum // 从以上最优组合中选取最优组合。

例如,18 条线路功率(单位 MW,下同)分别为 310.0,200.0,300.0,400.0,500.0,600.0,700.0,900.0,818.0,101.0,201.0,303.0,800.0,222.0,320.0,404.0,505.0,606.0;过负荷功率 2 500.0。在 Windows 2000 下,CPU 主频为 P 4 1.5 GHz,比较程序运行时间发现:穷举法为 10 ms,动态规划法为接近 0 ms。

下面对动态规划法应用进行说明(过负荷功率定值为 2 500)。

a. 取  $P_1$  为决策点,此时

$$\text{sum } P = P_1 = 310.0 < 1\ 000.0$$

b. 在倒数第 1 阶段,求取  $\min[2\ 500 - (P_1 + P_k)]$  ( $k=2,3,\dots,18$ ;下同)得: $k=8$ ,故

$$\text{sum } P = P_1 + P_8 = 1\ 210.0 < 2\ 500.0$$

c. 在倒数第 2 阶段,求取  $\min[2\ 500 - (P_1 + P_8 + P_k)]$  得: $k=9$ ,故

$$\text{sum } P = P_1 + P_8 + P_9 = 2\ 028.0 < 2\ 500.0$$

d. 在倒数第 3 阶段,求取  $\min[2\ 500 - (P_1 + P_8 + P_9 + P_k)]$  得: $k=5$ ,故

$$\text{sum } P = P_1 + P_8 + P_9 + P_5 = 2\ 528.0 > 2\ 500.0$$

此时已经达到切除负荷要求,运行结束。

e. 取  $P_2$  为决策点,得:

$$\text{sum } P = P_2 + P_8 + P_9 + P_6 = 2\ 518.0 > 2\ 500.0$$

f. 取  $P_3$  为决策点,得:

$$\text{sum } P = P_3 + P_8 + P_9 + P_5 = 2\ 518.0 > 2\ 500.0$$

g. 取  $P_4$  为决策点,得:

$$\text{sum } P = P_4 + P_8 + P_9 + P_{16} = 2\ 522.0 > 2\ 500.0$$

h. 取  $P_5$  为决策点,得:

$$\text{sum } P = P_5 + P_8 + P_9 + P_{13} = 2\ 518.0 > 2\ 500.0$$

i. 取  $P_6$  为决策点,得:

$$\text{sum } P = P_6 + P_8 + P_9 + P_2 = 2\ 518.0 > 2\ 500.0$$

j. 取  $P_7$  为决策点,得:

$$\text{sum } P = P_7 + P_8 + P_9 + P_{10} = 2\ 519.0 > 2\ 500.0$$

k. 取  $P_8$  为决策点,得:

$$\text{sum } P = P_8 + P_9 + P_{13} = 2\ 518.0 > 2\ 500.0$$

l. 取  $P_9$  为决策点,得:

$$\text{sum } P = P_9 + P_8 + P_{13} = 2\ 518.0 > 2\ 500.0$$

m. 取  $P_{10}$  为决策点, 得:

$$\text{sum } P = P_{10} + P_8 + P_9 + P_7 = 2519.0 > 2500.0$$

n. 取  $P_{11}$  为决策点, 得:

$$\text{sum } P = P_{11} + P_8 + P_9 + P_6 = 2519.0 > 2500.0$$

o. 取  $P_{12}$  为决策点, 得:

$$\text{sum } P = P_{12} + P_8 + P_9 + P_5 = 2521.0 > 2500.0$$

p. 取  $P_{13}$  为决策点, 得:

$$\text{sum } P = P_{13} + P_8 + P_9 = 2518.0 > 2500.0$$

q. 取  $P_{14}$  为决策点, 得:

$$\text{sum } P = P_{14} + P_8 + P_9 + P_6 = 2540.0 > 2500.0$$

r. 取  $P_{15}$  为决策点, 得:

$$\text{sum } P = P_{15} + P_8 + P_9 + P_5 = 2538.0 > 2500.0$$

s. 取  $P_{16}$  为决策点, 得:

$$\text{sum } P = P_{16} + P_8 + P_9 + P_4 = 2522.0 > 2500.0$$

t. 取  $P_{17}$  为决策点, 得:

$$\text{sum } P = P_{17} + P_8 + P_9 + P_3 = 2518.0 > 2500.0$$

u. 取  $P_{18}$  为决策点, 得:

$$\text{sum } P = P_{18} + P_8 + P_9 + P_2 = 2524.0 > 2500.0$$

从以上结果可以求得最优组合解:  $\{2, 8, 9, 5\}$ ,  $\{3, 8, 9, 6\}$ ,  $\{8, 9, 13\}$ 。

与穷举法比较, 动态规划法的方法有 2 个明显的优点:

- a. 大大减少了计算量;
- b. 丰富了计算结果。

与过切法比较, 动态规划法的方法有 2 个明显的优点:

- a. 计算量没有大的增加;
- b. 计算结果准确。

从以上运算结果, 可以看出应用动态规划法快速准确, 具有理想的运算性能。

## 4 结语

在电力安全稳定控制系统中, 为了保证电力系统的安全稳定运行, 需要稳定控制器快速准确地对运行故障作出反应, 在稳定控制系统低频低压减载中, 需要有快速准确的控制运行策略来保证。从以上分析及示例可以看出, 针对低频低压减载, 动态规划法具有计算量小、计算结果准确且丰富的特点, 完全可以满足稳定控制器的控制运行策略快速准确的要求。

因本文篇幅有限, 仿真程序未能在文中写出, 如有需要可与笔者联系。

## 参考文献:

- [1] 孙光辉, 沈国荣. 加强电网三道防线确保我国电力系统的安全[C]//中国科协 2004 年学术年会电力分会暨中国电机工程学会 2004 年学术年会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2005: 464-468.
- SUN Guang-hui, SHEN Guo-rong. Strengthen three defense

line of electric net, insure the safety of the our country electric power system[C]//China Science Institute Annual Academic Convention of 2004 and Chinese Electrical Engineerings of the Academic Annual Convention of 2004. Beijing: China Science and Technology Publish House, 2005: 464-468.

- [2] 刘伟, 郭志忠. 配电网安全控制模型及算法[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(8): 60-64.
- LIU Wei, GUO Zhi-zhong. Model and algorithm of security control for distribution network[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2003, 23(8): 60-64.
- [3] 李颖晖, 张保会. 正规形理论在电力系统稳定性研究中的应用(五)——电力系统的失稳模式预测[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(10): 9-13.
- LI Ying-hui, ZHANG Bao-hui. Application of normal form in study of power system stability. Part 5: prediction of electric power system unstable modes[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2003, 23(10): 9-13.
- [4] 吴麒. 自动控制原理(下册)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [5] 杨建兵, 李大鹏, 王忠义, 等. 线性规划在最优火力分配辅助决策中的应用[J]. 高校应用数学学报: A 辑, 2004, 19(增刊 1): 550-560.
- YANG Jian-bing, LI Da-peng, WANG Zhong-yi, et al. An application of linear programming in tank-company fire distribution auxiliary decision[J]. **Applied Mathematics A Journal of Chinese Universities**, 2004, 19(Supplement 1): 550-560.
- [6] 余炳辉, 王金文, 李彩林. 逐次逼近动态规划法求解水电机组组合问题[J]. 华中电力, 2004, 17(6): 1-3.
- YU Bing-hui, WANG Jin-wen, LI Cai-lin. DP with successive approximation for solving hydropower unit commitment problem[J]. **Central China Electric Power**, 2004, 17(6): 1-3.
- [7] KUNDUR P. 电力系统稳定与控制[M]. 周孝信, 译. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [8] 韩桢祥. 电力系统稳定[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [9] 余贻鑫, 刘辉, 曾沅. 基于实用动态安全域的紧急控制策略[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(6): 6-10.
- YU Yi-xin, LIU Hui, ZENG Yuan. A novel emergency control strategy based on practical dynamic security regions[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2004, 28(6): 6-10.

(责任编辑: 李育燕)

## 作者简介:

顿 敦(1972-), 男, 河南郾城人, 工程师, 从事电力系统安全稳定控制及电力系统综合自动化研发工作(E-mail: dund@sfauto.com);

许先华(1979-), 男, 湖北黄冈人, 工程师, 从事电力系统安全稳定控制研发工作;

吴兆国(1970-), 男, 山东梁山人, 工程师, 从事电力系统安全稳定控制研发工作。

# **Realization of optimal strategy for power system low-frequency and low-voltage load reduction**

DUN Dun,XU Xian-hua,WU Zhao-guo

(Beijing Sifang Automation Co.,Ltd.,Beijing 100085,China)

**Abstract:** The low-frequency and low-voltage load reduction control strategy of power system stability control system is analyzed. Mathematical model of the optimal strategy is established for eighteen load lines as an example. The exhaustedness approach,over switching-off method and dynamic planning method are applied respectively with comparison of operation process,computing time,merits and deficiencies. Results show that,compared with exhaustedness approach,dynamic planning method achieves richer result with less computing;while compared with over switching-off method,it achieves more precise result with a little more computing.

**Key words:** stability control system; low-frequency and low-voltage load reduction; optimal strategy; dynamic planning method