

福建电网基于在线安全稳定控制与 预警系统的稳控策略表设计方法与实现

苏毅¹, 俞秋阳², 毕兆东²

(1. 福建电网公司, 福建 福州 350003; 2. 南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 福建电网在线安全稳定控制与预警系统根据当前电网运行方式生成针对预想故障的稳定控制策略, 并按照特定的格式将稳定控制策略和电网潮流特征量存储在历史数据库中。预想故障的稳定控制策略与电网某些潮流特征量之间存在特定的关系, 利用相关性分析的方法找出与稳定控制策略强相关的特征量, 将其作为策略表公式的自变量, 建立多项式函数形式的计算公式。在此基础上利用拟合方法给出相关的系数定值, 并根据电网的不同接线方式对策略表定值进行归类。该方法有效地利用了在线安全稳定控制与预警系统的分析结果, 揭示了稳定控制策略与电网运行方式之间的定量关系, 简化了安全稳定控制系统策略表的制定与整定工作, 有很强的通用性与应用前景。

关键词: 福建电网; 在线安全稳定控制与预警; 稳控策略表

Design and implementation of stability control scheme list based on on-line security and stability control and warning system in Fujian Power Grid

SU Yi¹, YU Qiu-yang², BI Zhao-dong²

(1. Fujian Power Grid Dispatch and Communication Center, Fuzhou 350003, China;
2. NARI Relays Electric Co Ltd, Nanjing 211102, China)

Abstract: Power system stability control scheme lists for expected faults are generated with on-line security and stability control and warning system in Fujian power grid according to the current power system operation mode. The lists and the power flow characteristic variables are stored in database with special storage format. Correlation exists between stability control scheme lists for expected faults and power flow characteristic variables. Strongly correlated variables can be found with correlation analysis method and the formula in the form of polynomial function will be established by taking the variables as independent variable of the scheme list formula. Fitting method is used to get the related coefficient value, and the scheme list values are classified according to different connecting modes. The method discussed in this paper effectively uses the analysis results of on-line security and stability control and warning system, indicates the quantitative relation between the stability control scheme and power system operation mode, and simplifies the formulation and setting for power system stability control scheme lists, which has a strong versatility and application prospects.

Key words: Fujian Power Grid; on-line security and stability control and warning; stability control scheme list

中图分类号: TM712; TM761 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)05-0097-05

0 引言

电网运行的三道防线是我国电网安全稳定运行的成功经验, 其中第二道防线主要是指采用稳定控制装置及切机、切负荷等紧急控制措施, 确保电网在发生概率较低的严重故障时能保持稳定运行^[1-2]。分散决策方式的区域型稳定控制是目前电网第二道防线所采用的主要方式, 而控制策略表是区域稳定控制的基本依据, “在线预决策, 实时匹配”则是形

成策略表的较好方案^[3-5]。

迄今为止, 很多省级或大区级电网已经建立了“在线安全稳定控制与预警系统”(以下简称“在线系统”)^[6], 其中福建电网借助在线系统已经实现了“在线预决策, 实时匹配”形成稳控系统策略表的功能, 这种由在线系统形成并下载到稳控装置中的策略表, 称之为“在线策略表”^[7]。

在线系统不但可以根据当前潮流方式和预想故障集生成新的策略表, 而且还可以记录电力系统当

前运行方式的某些特征信息,例如:元件检修信息、线路或断面输送功率、枢纽母线电压等。在线系统将这些方式特征信息与相应的在线策略表存储到历史数据库中,经过一段时间的运行,在线系统已经保存了相当多的策略表和方式特征量,称之为“历史策略表及其相关变量”。稳控策略表与这些信息均存在着较强的相关关系,每一个策略表的控制量都可以看作由这些变量所决定的解,通过对历史策略表的数据挖掘工作可找出其中的规律,从而归纳简化出策略表计算公式,启动简化策略表制定与整定工作的作用。

1 福建在线安全稳定控制与预警系统简介

福建在线安全稳定控制与预警系统由位于福建中调的主站、11个500kV变电站中的子站、以及6个220kV变电站中的切负荷执行站组成。其中主站系统主要由24台刀片式服务器构成,采用RCS-9001调度自动化系统作为软件平台,可以直接从福建省调CC2000A型EMS系统导入电网模型、数据以及厂站图。系统的结构图如图1所示。

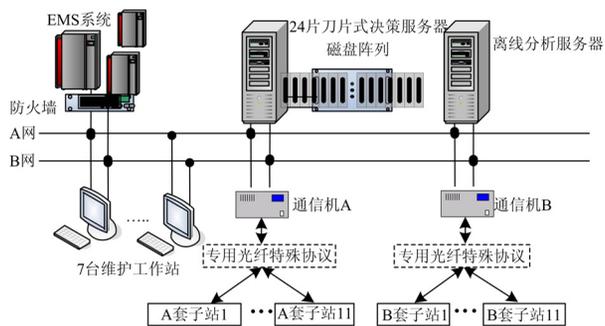


图1 福建在线安全稳定控制与预警系统

Fig.1 On-line security and stability control and warning system in Fujian power grid

该系统紧密结合福建电网的运行特点和暂态稳定控制的实际要求,以计算机技术和网络通信技术为支撑,在开发自主知识产权在线安全稳定分析程序的基础上,实现了更多的电网分析功能,其中包括:

- (1) 电网在线稳定控制决策与策略表刷新;
- (2) 动态 N-1 故障扫描;
- (3) 临界切除时间计算;
- (4) 静态电压稳定性分析;
- (5) 小扰动稳定性分析;
- (6) 短路电流计算;
- (7) 实时网损计算;
- (8) 断面极限输送功率计算;
- (9) 电网元件开断分析。

利用这些功能模块,福建在线系统实现了电力系统安全稳定控制与预警以及稳定裕度的准确量化,为调度员调整运行方式、实现预防控制提供了科学依据。体现了建设电网动态稳定监测预警系统,实现电网的在线稳定计算的发展趋势。

本文所要论述的稳控策略表设计方法是对在线系统的“电网在线稳定控制决策与策略表刷新”功能的一种扩展应用。实现了在线系统分析结果的数据挖掘与分析,并成为在线系统功能模块之一。

2 控制策略及其相关信息的存储

福建在线系统将计算得出的各个预想故障的控制策略及其相关信息以特定格式存储在历史数据库中,将其归类为接线方式、潮流方式、故障信息、控制策略这四种类型^[8-9],并以较为紧凑的形式存放控制策略表及其相关信息,具体描述如下:

(1) 接线方式

用户首先选定纳入接线方式集合的元件,每个元件的状态用布尔值表示,投运时为“真”,检修时为“假”。当这些元件中的某一个或某几个出现检修时,即认为系统出现一种“元件检修状态”。

(2) 潮流方式

用户选定纳入决定系统潮流方式的变量,此类变量称之为“特征量”。譬如,线路或断面的有功功率,枢纽变电站的母线电压等。这些变量组成的特征量集合的状态,决定了系统潮流的运行方式。

(3) 故障信息

用户需要确定预想故障集,通常是纳入电网安全稳定第二道防线监控范围内的 N-2 故障。譬如,双回线中一回线故障跳闸,短时间内另一回线无故障跳闸,或断面断开等。

(4) 稳定控制量

在线系统决策出的针对某一预想故障的控制量,譬如,联切机组功率(MW),或者联切负荷数量(MW)等。需要指出的是,最优控制方法和控制量的求取属于控制策略优化的范畴,本文不做讨论,本文假设针对某一具体的预想故障,其控制措施的类型(切机/切负荷)以及求取控制量的原则与方法已经确定,即控制量的具体数值是由在线系统计算得出。

综上所述,福建在线系统将预想故障及其相关信息按特定的结构存储于历史商用数据库中,实现存储空间的最小化,并方便于利用这些计算结果进行策略表数据挖掘。在商用库中存储的格式如图2所示。

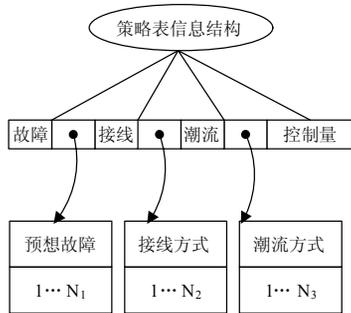


图2 预想故障控制措施及其相关信息存储结构

Fig.2 Saving structure for on-line scheme list and power system information

3 控制策略强相关变量的确定

从简化策略表计算公式的角度出发, 假设任一预想故障的控制量与 1 到 2 个潮流特征量存在线性关系, 并认为这种关系在各种接线方式下均存在。根据这一假设, 将某一预想故障的控制量视为因变量, 从众多潮流特征量中选取与因变量强相关的特征量作为自变量便成为制定策略表的第一步工作。

计算控制量与潮流特征量之间, 以及各个潮流特征量之间的相关系数矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r_{yx_1} & \cdots & r_{yx_n} \\ r_{x_1y} & 1 & \vdots & r_{x_1x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{x_ny} & r_{x_nx_1} & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)}$$

其中: y 表示预想故障的稳定控制量; $x_i (i = 1, \dots, n)$ 表示潮流特征量。控制量 y 与 x_i 相关系数 r_{yx_i} 的计算公式如下:

$$r_{yx_i} = \frac{\sum_{k=1}^m (y_k - \bar{y})(x_{ki} - \bar{x}_i)}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (y_k - \bar{y})^2 \sum_{k=1}^m (x_{ki} - \bar{x}_i)^2}}$$

其中: $k = 1, \dots, m$ 表示样本个数; \bar{y} 表示控制量的样本均值; \bar{x}_i 表示第 i 个潮流特征量的样本均值。而潮流特征量之间的相关系数计算公式与上式类似。

相关系数 r 具有以下特性:

(1) 相关系数取值范围为 $|r| \leq 1$ 。

(2) 相关系数 r 的符号反映变量间的相关方向。当 $r > 0$ 时, 变量间的线性相关关系为正相关, 这时 y 随着 x 增加而线性增加; $r < 0$ 时, 变量间的线性相关关系为负相关, 这时 y 随着 x 增加而线性减少。

(3) 若相关系数 $|r|$ 愈接近 1 时, 两个变量间的线性相关程度愈高; 若相关系数 $|r|$ 愈接近 0 时, 两个变量间的线性相关程度愈低。通常当 $r=0$ 时, 变量间无线性相关关系, 但可能存在其他非线性关系; 当 $|r|=1$ 时, 变量之间存在完全确定的线性相关关系。

根据计算结果本文将 $|r_{yx_i}| > 0.7$ 的自变量归类为强相关变量; $0.3 < |r_{yx_i}| \leq 0.7$ 的自变量归类为中度相关变量; $|r_{yx_i}| \leq 0.3$ 的自变量归类为轻度相关变量。用户则结合自身的经验和知识在强相关变量中选取 1 到 2 个特征量作为决定该预想故障控制量的自变量。

借助控制量与特征量的相关性分析选择 1 个自变量, 则采用一元线性回归的方法建立因变量与自变量的函数关系, 若选择 2 个自变量则采用二元线性回归的方法建立因变量与自变量的函数关系。

筛选自变量时应当注意掌握好以下几点, 所选自变量必须对因变量有显著的影响; 所选自变量应该具有较为完整的统计数据资料, 而且自变量本身的变动有一定的规律性; 所选的自变量与因变量之间具有较强的相关性, 而不是形式上的相关; 所选的自变量之间的相关程度不应高于自变量与因变量之间的相关程度。应当尽可能地避免自变量之间高度线性相关, 简化控制策略的计算公式。

4 策略表公式与定值的确定

确定某一预想故障控制量的自变量后, 策略表计算公式也随之确定, 当自变量个数为 1 时, 策略表计算公式具有如下形式:

$$y = b_0 + b_1x$$

当自变量个数为 2 时, 策略表公式具有如下形式:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$$

其中 b_0, b_1, b_2 即为策略表公式的计算系数。考虑到随着接线方式的改变, 策略表公式的计算系数可能需要改变, 同时并不是每个接线方式都需要一套单独的计算系数, 对于某一预想故障而言, 大多数接线方式下可以共用同一套系数, 只有个别检修方式下需要设立单独的系数。但如何对这些接线方式进行归类, 以往都是采用人工判断的方法, 本文借助各类接线方式样本与已有模型的可决系数给出定量化指标, 借此实现与接线方式的归类与定值的整定。

首先将某一预想故障的控制量及其相关自变量的样本按照接线方式划分成若干类。通常先根据全接线方式的样本采用线性回归方法进行参数估计,

得到基于此类样本的策略表公式系数定值估计值。当考虑下一种接线方式样本时，计算此类样本相对于已有定值估计值的可决系数 R^2 。

R^2 的计算方法如下。已知该接线方式的样本观测值 (y_i, x_i) , $i = 1, \dots, n$, y_i 为此类样本的控制量的第 i 个观测值, x_i 为此类样本的特征量的第 i 个观测值。可决系数 R^2 的计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS}$$

其中: $RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$, 表示该接线方式下控制量样本值与当前策略表公式计算值残差的平方和;

$TSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$, 表示该接线方式下控制量与该类样本均值离差的平方和。

可以证明可决系数 R^2 的取值范围为: $[0, 1]$, R^2 越接近于 1, 表明当前定值下策略表公式计算出的控制量与实际所需控制量越接近, 策略表公式的拟合度越高。利用这一指标评判该接线方式的策略表公式能否使用当前定值, 从而实现接线方式的归类, 减少策略表定值的套数。

当某个接线方式控制量样本相对于已有各套定值的可决系数出现大于阈值的情况时, 则认为该接线方式的控制量可以利用可决系数最大的那套定值来计算, 因此该接线方式的样本可以与估计此套定值所使用的各类接线方式的样本进行合并, 随后再利用新的样本集合对该套定值系数重新进行估计。反之, 当该接线方式控制量样本相对于已有各套定值的可决系数均低于阈值时, 则认为需要一套新的定值用于计算该接线方式下的控制量, 利用该接线方式的样本估计出这套新的定值。用这种方式实现各种接线方式的归类, 并得出相应的策略表定值。程序的流程如图 3 所示。

作为福建在线安全稳定控制与预警系统的一个子模块, 上文所论述的算法已经在实际中得到了应用, 以福建电网在线系统计算得出的控制策略为样本拟合得到的策略表计算公式已经逐步取代传统的离线控制策略, 从而大大减轻了福建电网方式调度人员的日常工作量。同时, 与传统的离线控制策略相比, 其切机切负荷量更为精确。

5 结语

本文提出了一种以在线安全稳定控制与预警系统决策出的稳定控制策略为样本进行稳控策略研究与定值整定的新方法, 该方法将在线系统给出的预想故障控制量与系统特征量作为样本数据, 首先通

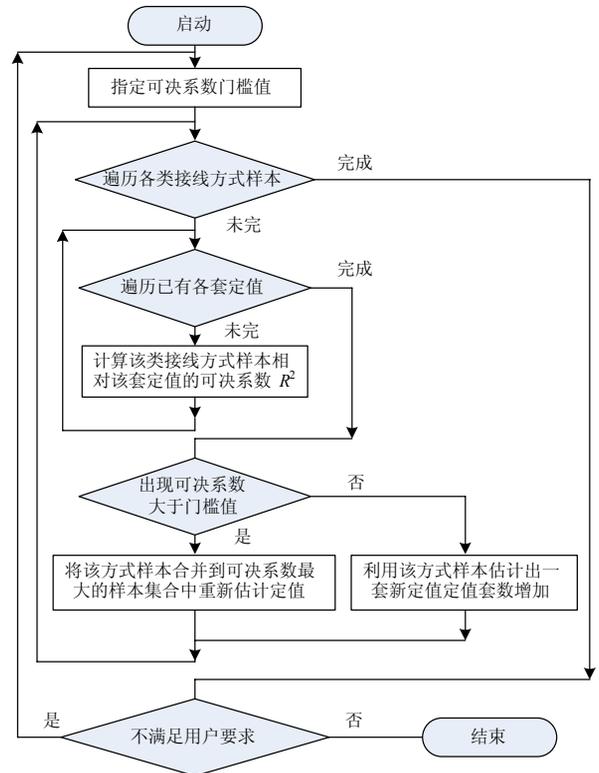


图 3 定值整定流程图

Fig.3 Flow chart of setting value

过相关性分析的方法确定与稳定控制量相关性较强的 1 到 2 个特征量作为自变量, 由此确定策略表公式的自变量数目与形式。然后按照接线方式对样本进行分类, 通过一元或二元线性回归的方法确定策略表公式的定值, 并利用各个接线方式样本的可决系数指标进行接线方式归类, 从而得到不同接线方式下的策略定值。这种方法不但可以充分利用在线系统的计算信息, 而且可以简化策略表制定的工作量, 所生成的控制策略表不仅计算简单、通用性强、易于修改, 最重要的是实现了策略表制定工作的数据统计分析功能。

该方法已经在“在线历史策略表数据分析与挖掘工具”中得以实现, 并作为福建在线安全稳定控制与预警系统的一个子模块。

同时这种分析方法不仅可以应用于在线系统的控制决策数据信息挖掘, 而且可以通用于各类系统稳控策略的制定工作, 因此有很强的实用性和应用前景。

实际应用中也发现某些控制策略的自变量与应变量之间的关系用线性函数来表达并不精确, 可考虑通过非线性回归的方法建立自变量与应变量之间的非线性表达式, 从而进一步提高稳定控制量的精确性, 减少切机切负荷的误差, 这是本课题正在研

究的内容。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. DL 755-2001, 电力系统安全稳定导则[M]. 北京: 世界图书出版公司, 2001.
State Economic and Trade Commission of the People's Republic of China. DL 755-2001, guide on security and stability for power system[M]. Beijing: World Publishing Corporation, 2001.
- [2] 孙光辉, 沈国荣. 加强三道防线建设确保电网的安全稳定运行[J]. 江苏电机工程, 2004, 23 (5): 4-7.
SUN Guang-hui, SHEN Guo-rong. Enhancing three-defense lines for insuring the security and stability of the power system of China[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2004, 23 (5): 4-7.
- [3] 孙光辉. 区域稳定控制中若干技术问题[J]. 电力系统自动化, 1999, 3 (2): 1-7.
SUN Guang-hui. Techniques in regional stability control[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 3 (2): 1-7.
- [4] 龚瑛, 刘启胜. 区域型稳定控制系统的策略表在线刷新机制的研究[J]. 继电器, 2005, 33(21): 40-44.
GONG Ying, LIU Qi-sheng. Study on on-line refresh mechanism of scheme list in regional stability control system[J]. Relay, 2005, 33(21): 40-44.
- [5] 周良松, 彭波, 夏成军, 等. 一个实用的电力系统分层决策稳定控制系统[J]. 继电器, 2000, 28(4): 16-19.
ZHOU Liang-song, PENG Bo, XIA Cheng-jun, et al. Study on new transient stability control pattern with on-line hierarchical decision-making and control[J]. Relay, 2000, 28(4): 16-19.
- [6] 赵勇, 苏毅, 陈峰, 等. 福建电网在线稳定控制系统华东电网的实时动态等值研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (4): 18-22.
ZHAO Yong, SU Yi, CHEN Feng, et al. Real-time dynamic equivalence of east china power grid for on-line stability control system of fujian power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (4): 18-22.
- [7] 孙光辉, 毕兆东, 赵希才, 等. 电力系统在线安全稳定评估及决策技术的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (17): 81-84.
SUN Guang-hui, BI Zhao-dong, ZHAO Xi-cai, et al. Technology of on-line power system stability evaluation and decision-making[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (17): 81-84.
- [8] 张岩, 王健全, 何奔腾. 一种新的电力系统稳定控制策略表表述及存储方式[J]. 继电器, 2003, 31 (12): 55-58.
ZHANG Yan, WANG Jian-quan, HE Ben-teng. A new method of expression and storage on decision table for the stability control of power systems[J]. Relay, 2003, 31 (12): 55-58.
- [9] 杨洁, 周良松, 代仕勇, 等. 电力系统在线暂态稳定控制系统的数据库设计方案[J]. 继电器, 2005, 33(21): 51-53.
YANG Jie, ZHOU Liang-song, DAI Shi-yong, et al. Database design scheme for power system online transient stability control system[J]. Relay, 2005, 33(21): 51-53.
- 收稿日期: 2010-03-22; 修回日期: 2010-05-28
- 作者简介:
苏毅(1971-), 男, 高级工程师, 硕士, 从事电力系统稳定分析控制研究和相关软件开发工作;
俞秋阳(1980-), 男, 工程师, 硕士, 从事电力系统稳定分析控制研究和相关软件开发工作;
毕兆东(1974-), 男, 高级工程师, 博士, 从事电力系统稳定控制与在线稳定分析方面的研究和相关软件开发工作。
-
- (上接第 96 页 continued from page 96)
- [14] 郑漳华, 艾芊, 顾承红, 等. 考虑环境因素的分布式发电多目标优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (13): 23-28.
ZHENG Zhang-hua, AI Qian, GU Cheng-hong, et al. Multi-objective allocation of distributed generation considering environmental factor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (13): 23-28.
- [15] Baran M E, Wu F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4 (2): 1401-1407.
- 收稿日期: 2010-03-16; 修回日期: 2010-05-11
- 作者简介:
张立梅(1972-), 女, 讲师, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析、新能源发电配电规划、运行及可靠性评估等;
E-mail: lzmzhch@yahoo.com.cn
唐巍(1971-), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制、地方电力系统优化运行、配电网可靠性、电网性能评估等。