

我国地区电力系统灾变防治体系的研究

黄日星¹, 李锐², 胡伟³

(1. 国家电力监管委员会南方监管局, 广东 广州, 510180; 2. 广东电网公司深圳供电局, 广东 深圳, 518001;
3. 清华大学电力系统国家重点实验室, 北京, 100084)

Collapse Prevention and Economical Operation System for the Region Power System of China

HUANG Ri-xing¹, LI Rui², HU Wei³

(1. South China Bureau of State Electricity Regulatory Commission of China, Guangzhou, Guangdong 510180, China;
2. Shenzhen Power Supply Bureau, Shenzhen, Guangdong 518001, China;
3. Electrical Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 10084, China)

Abstract: Based on the intrinsic characteristics of Multi-Layer and Multi-Level of the power system in China, an architecture design of the Collapse Prevention and Economical Operation System (CPEOS) with "3-Line of Defence" for region power systems is presented in this paper, i.e. the economical operation and static security system as the first line of defence; the emergency control system when the grid undergoing large disturbances as the second; and the separation strategies when the emergency control actions cannot keep the integrity of the power network as the third. Furthermore, a systematic study on the detailed implementation scheme of the "3-Line of Defence" is carried out.

Key words: region power system; collapse prevention system; hybrid automatic control system; emergency control; emergency separation

摘要: 基于我国电力系统所具有的分级、分层的特点, 提出了应用于地区电力系统的电力灾变防治体系的“三道防线”设计: 地区电网的经济运行和静大扰动时的紧急控制系统作为第二道防线; 在危急情况下

的紧急解列控制系统作为第三道防线。进而对构成“三道防线”的具体实施方案进行了系统性论述。

关键词: 地区电力系统; 灾变防治体系; 混成自动控制系统; 紧急控制; 紧急解列

电力作为一个国家的支柱能源和经济命脉, 在国民经济的可持续发展中起着不可替代的支撑作用, 如何保证其安全稳定和经济运行, 防止灾难性事故的发生, 是国家亟待解决的重大课题之一^[1,2]。

地区电网是各省网的重要组成部分, 由于电网的负荷增长迅速, 电网结构变化迅速; 同时地区电网一般属于较强的受端系统网络, 负荷密集, 电网联系紧密, 短路电流水平相对较高, 因此提高电压质量和保证系统的电压稳定性和经济运行成为地区电网的一个极具挑战性的问题。

为了保证我国各地区电网的安全、稳定、经济运行, 需要总结国内外电网现代控制技术发展与应用的情况, 分析地区电网控制现状, 论证在地区电网实现灾变防治对策研究的必要性。同时借鉴国内外电力系统自动灾变防治的先进经验, 研究地区电网基于混成系统 (Hybrid) 理论建立经济运行和灾难性事故防治对策的可行性。

1 地区电力系统灾变防治体系结构

地区电力系统灾变防治体系可用“三道防线”

来形象的进行描述。

1.1 第一道防线——经济运行与静态安全保障体系

现代电力系统在实际运行时，负荷变化、机组起停、变压器分接头调整等小干扰事件所带来的振荡对系统的安全稳定运行是非常有害的，通过对发电机组、无功补偿设备及 FACTS 装置这些常规控制设备的调整使得系统尽快的从振荡中平复过来，以提高系统的稳定水平。

同时，系统也可通过对这些常规控制设施的调整使得系统的运行点在系统稳定域内缓慢移动，以达到其最优运行点（经济性最优，或系统具有最大的稳定裕度，或多目标的协调最优）。这种对系统内常规控制装置进行调整的方法可被视作区域电力系统灾变防治体系的第一道防线。

1.2 第二道防线——紧急控制系统。

当系统遭受如断线、发电机跳闸等事故产生的大扰动冲击的时候，需要采用切机切负荷等紧急控制手段以保证系统的暂态功角/电压稳定。基于这些紧急控制措施的紧急控制系统可被看成为区域电力系统灾变防治体系的第二道防线。

1.3 第三道防线——紧急解列控制系统。

当第二道防线中所采用的紧急控制措施仍然无法避免电力系统的安全性遭到破坏时，为了避免事故的进一步扩大而导致电网全面崩溃，这时可以主动将互联电网解列成几个相互独立的孤岛运行，以尽量减少停电的规模和影响用户的数目，同时也使得事故后的恢复更加容易。我们称这种紧急情况下的主动解列措施为区域电力系统灾变防治体系的第三道防线。

2 经济运行与静态安全保障体系研究

我国目前无功控制采取分层分区就地平衡的原则，电压则实行中枢点和监测点管理，基本上是一级控制，没有做到整个系统范围内的协调、安全和经济调节。同时个别地区电网一直采用传统的电压/无功调度方式，对无功和电压调控的目标仅仅是电压的质量，尚未考虑网损和电压稳定性因素。应该说，我国地区电网无功电压的运行管理水平亟待改进。

我们基于混成系统理论，结合地区电网的实际情况，提出地区电网静态混成自动电压控制（HAVC）系统^[3,4]设计方案，系统结构如图 1 所

示。

该方案将突破传统的分级控制的局限性，并以地区电网全系统范围内的安全、优质、经济为控制目标，在地区电网率先实施分层、多目标优化的自动电压/无功控制系统，改善地区电网运行的安全性、电压品质和经济性，实现系统内无功的合理分布，改善电压品质，降低网损，以及提高系统的电压稳定性，最大限度地预防电压崩溃事故发生。

在静态电压混成控制系统中，首先由电压调控选择离散判断环节根据电力系统的实际运行状态作出判断^[5]，并形成离散事件去驱动相应的控制策略。在静态电压最高控制层受到事件驱动后，对电力系统当前的电压安全性和运行的经济性分别进行分析判断，一旦有指标越限，将形成离散事件去驱动相应的控制环节，生成最高层的控制指令并下达到电压中间控制层。

同时，最高层还可以接受调度中心调度员的调度指令并发送至中间层，并且可以将最高层控制指令输出显示给调度员。中间控制层接受电压调控选择离散判断环节的离散事件驱动后，接收最高层下达的控制指令，并在掌握电力系统运行状态和控制设备投运情况下，选择合适的控制对象和控制策略，形成优化控制指令，并通过指令输出环节下达给底层的各个发电厂、变电站等。

底层控制设备接受指令后控制器动作，改变电力系统的运行状态，达到混成控制系统的设定值，从而保证系统的安全经济运行。

建立地区电网经济运行与静态安全保障体系对于地区电力事业的发展具有极其重要的意义。首先，在地区电网实现静态混成自动电压控制系统可以有效提高和改善地区电网系统电压水平和运行的安全性及经济性。

其次，静态混成自动电压控制系统可以提出地区电网电压不稳定/崩溃的预防和校正策略，预防由于电压崩溃而导致的大停电事故。此外，电压控制实际上调控了电力系统的无功潮流，而无功潮流的优化将有效降低网络损耗，提高电力系统运行的经济性，因此静态混成自动电压控制系统可以有效降低地区电网的网络损耗，提高地区电网的经济性。此外，静态混成自动电压控制系统的实施能有效降低地区电网调度运行人员的工作强度。

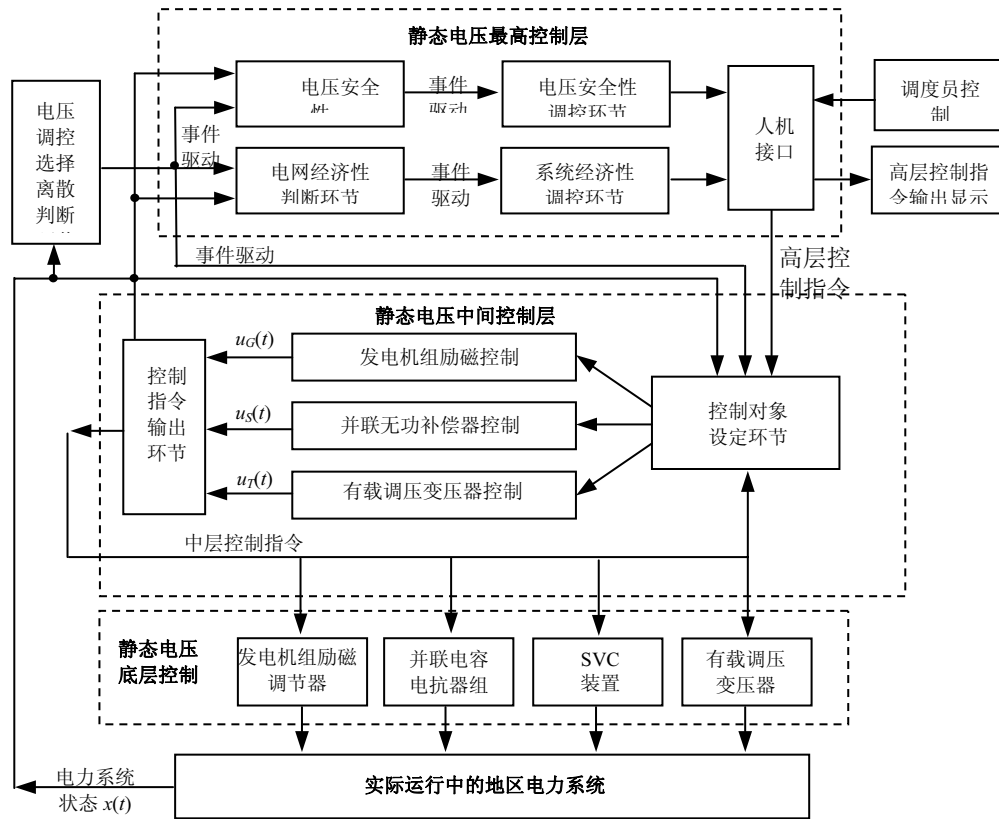


图 1. 静态电压混成控制系统框图
Fig. 1 Static Hybrid Automatic Voltage Control (HAVC)

3 电网紧急控制系统的研究

区域电网的紧急控制系统分为两部分，一部分是在区域电网的直管电厂内实现汽门和励磁协调非线性控制，另外是在电网内部建立基于能量的紧急控制系统。

3.1 汽门和励磁协调非线性控制

发电厂的控制对象主要包括励磁系统和调速系统。传统的励磁和调速系统是对机端电压偏差和转速偏差进行 PID 控制，即以控制机端电压恒定和转速恒定为目标。这种传统的控制方式不能有效解决因互联电力系统的“欠阻尼”而带来的低频振荡问题。为此，20 世纪 70 年代和 80 年代美国学者迪米罗 (F. D. deMello) 和加拿大余耀南教授等分别提出了电力系统稳定器 (PSS)^[6]和线性最优励磁控制 (LOEC) 的控制方式^[7]。这两种励磁控制技术对解决互联系统的低频振荡是有效的。然而，电力系统的强非线性的特点决定了这些建立在近似线性化模型基础上的控制策略不能很好适应互联大系统运行方式和结构的变化；尤其在电力系统遭受大干扰使

得实际的状态点偏离设计所选的平衡点较远时，基于近似线性化方法设计的 PSS 和 LOEC 的控制效果就会大大减弱^[8]。

我国学者在 20 世纪 90 年代发展了基于微分几何精确反馈线性化理论，并将其应用于电力系统控制，形成了一套较完整的电力系统非线性最优控制和非线性鲁棒控制理论和技术体系^[8,9]，这是对电力系统控制技术的突破。应用该理论和技术，可以显著提高互联电力系统的大干扰稳定性（暂态稳定性），成为提高系统运行的安全性和防治灾变的有力措施和手段。因此在地区电网的直管电厂内采用发电机组汽门和励磁综合最优非线性控制可大量节约装置设备投资，而且可以减小电压波动及频率波动，改善动态品质以及提高系统抗干扰能力等。

3.2 基于能量的紧急控制系统

如果故障后系统对应的初始状态位于相应稳定平衡点的稳定域边界以外，则电力系统状态的运动轨线就会远离故障后系统的稳定平衡点，物理上就形成了振荡失稳或单调失稳，所有电气量的幅值与相角处于不断的变化之中，而不能稳定到平衡状态，

这种运行状态持续下去,势必导致整个运行电力系统的崩溃。因此,如果故障后电力系统的相应运行状态位于故障后稳定平衡点的稳定域边界之外时,电力系统的运行人员必须采取相应的控制措施,称为紧急控制,来保证运行电力系统的稳定。

控制措施包括紧急制动电阻的投切、切机、切负荷等。从能量的观点来看,这些措施,无论是制动电阻的投切,还是切机、切负荷,实际上就是向网络中注入或抽取一定数量的能量,以达到削弱故障过程中所积聚的能量不平衡对电力系统稳定的影响,如果故障中所积聚的不平衡的暂态能量能够迅速的被消耗殆尽,则紧急控制后的电力系统就是稳定的。显然,在采取了注入或抽取能量的紧急控制措施后,相应的电力系统已经不同于紧急控制前,因此,基于能量的紧急控制的核心思想就是通过向故障后的电力系统注入或抽取一定数目的能量,使紧急控制后电力系统的初始状态位于其相应的渐近稳定平衡点的稳定域内,从而达到镇定故障后受扰电力系统的目的^[10]。

总而言之,通过应用能量的方法选取适当的地区电网紧急控制策略,从而控制紧急低频低压减载装置动作,使采取紧急控制措施后的系统初始状态重新回到紧急控制后电力系统新的渐近稳定平衡点的吸引域之内,从而达到镇定受扰电力系统的目的。

4 紧急解列控制系统的研究

当区域电网遭受巨大的外界干扰(例如多条主要的输电线路发生三相短路或者断线,或者直流发生换相失败导致停运),导致系统的稳定性无法保证的时候,为了最大程度的保证电网的用电,减轻电网事故的影响,避免发生大面积停电事故,就需要进行电网的紧急解列控制,这就是地区电网灾难性事故防治的第三道“防线”——电网的紧急解列控制系统。

一个可供选择的合理做法是:与其等待系统被动地被继电保护装置以难于预测的方式分解,不如按照被恰当选择的解列策略主动将电力系统解列成能够独立地稳定运行的电力孤岛。因此,主动解列应该被作为拯救电力系统以避免其被动解列乃至崩溃的最后一道防线。实际上,在一些重大停电事故中,若及时地采取主动解列(Controlled System Separation)措施,将有可能避免系统全面崩溃的发

生。主动解列是一种有效地避免处于紧急状态的电力系统发生被动解列乃至全面崩溃的控制措施,是在灾变事故下保障电力系统安全运行的最后防线。虽然在解列后整个电力系统并未工作于正常状态,而是被分割为若干个电力孤岛,但是各电力孤岛内的子电力系统仍能够保持同步稳定地运行。因此,主动解列能保证绝大多数用户得以持续地获得供电,避免因全面停电而带来的巨大经济损失。

地区电网的紧急解列控制系统将基于有向二位决策图(Ordered Binary Decision Diagrams,简称OBDD)方法和验证理论搜索地区电网的电力系统解列策略,提出并实现地区电力系统的合理解列策略的快速搜索算法,并最终在地区供电局的调度中心加以实现和运行。基于OBDD表示法,同时针对地区电网的实际情况,我们原创性地提出了灾变下在线搜索地区电网合理解列策略的三阶段方法。在第一阶段,建立电网的图模型并完成参数初始化,进而利用图论和电网特征对电网的图模型进行预处理,以形成供搜索解列策略的简化图;在第二阶段,利用基于OBDD的算法搜索能分离异步的发电机群且使各电力孤岛内能量供需平衡的解列策略;在第三阶段,对第二阶段给出的解列策略,通过快速的电网潮流计算检验各传输线容量约束是否满足,给出备选的合理解列策略。

在实际操作中,需要对地区电网合理解列策略的三阶段方法设计合理的实施方案,以使其能有效地完成在线的解列策略搜索。为了缩短用于搜索合理解列策略的在线时间花费,应当将尽可能多的工作安排在离线即故障发生之前进行。通过分析可以发现,三阶段方法中的大部分工作无需等到故障发生就可进行。例如,某些仅与电网结构有关的工作完全可以事先被完成,仅当电网结构发生变化时,才考虑是否有必要进行修正;某些仅与电网的潮流分布有关的工作,仅当电网的潮流分布发生明显变化时,才需要再次进行。由于紧急解列策略需要在电网发生大的扰动后非常短的时间内得出,因此在实际应用中对计算时间的要求非常严苛。为了尽量减少计算量,在设计实际应用的紧急解列系统时需要将事故发生后在线计算的任务减少到最低程度。因此,我们采用了如图2所示的紧急解列系统构架,整个系统包括三个计算层次:长期离线层、短期离线层以及在线层^[11]。

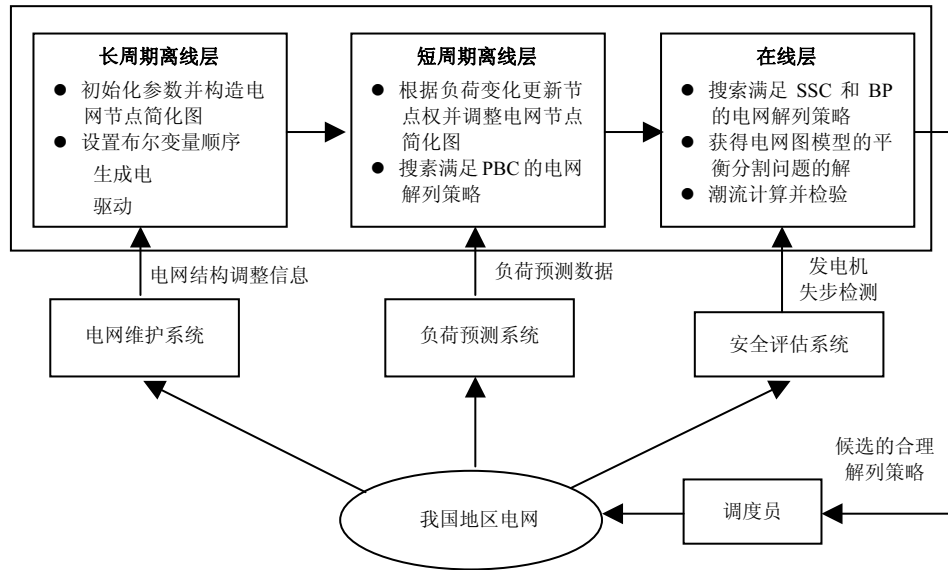


图 2. 地区电网合理解列策略的实施结构
Fig. 2 Structure of Emergency Separation Control System

5 结束语

跨大区电网的互联、负荷水平的高速增加和电力市场改革的不断深入等因素使得电力系统愈发接近其稳定极限。这使得防止灾变性事故的发生成为电力工作者的首要任务。本文提出了我国地区电网的区域级电力系统灾变防治体系,并详细介绍了构成该体系的实施方案和事故防治措施。该体系的提出不仅对地区级电网的安全、稳定、经济运行有比较好的指导作用,同时也为省级、网级电力系统灾变防治体系打下了坚实的基础,具有重要的理论和实践意义。

参考文献:

[1] 卢强, 梅生伟. 面向 21 世纪的电力系统重大基础研究[J]. 自然科学进展, 2000, 10(10): 870-876.
LU Qiang, MEI Sheng-wei. Vital basic research on modern power systems geared to 21st century. Progress in Nature Science, 2000, 10(10): 585-593.

[2] 卢强. “我国电力大系统灾变防治和经济运行的重大科学问题的研究”项目简介[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(1):6.
LU Qiang. “Collapse Prevention Theory and Application to Interconnected Power Systems” Project Introduction[J]. Automation of Electrical Power System, 2000, 24(1): 6.

[3] 胡伟. 电压混成自动控制 (HAVC) 系统的研究[D]. 北京: 清华大学电机工程与应用电子技术系, 2002.
HU Wei. Studies on the Hybrid Automatic Voltage Control System. [D]. Beijing: Tsinghua University, 2002.

[4] 卢强, 胡伟. 混成电力控制系统及其应用[C]// 第二十三届中国控制会议, 中国: 无锡, 2004:1242-1246.
LU Qiang, HU Wei. Hybrid power control system and its application.

The 23th Chinese Control conference[C]. China: Wuxi, 1242-1246, 2004.

[5] 胡伟, 梅生伟, 卢强, 等. 东北电网混杂自动电压控制的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 69-73.
HU Wei, MEI Sheng-wei, LU Qiang, et al. Chinese Northeast Power Network's hybrid automatic voltage control research[J]. Automation of Electrical Power System, 2004, 28(1): 69-73.

[6] Prabha Kundur. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1993.

[7] YU Y N. Electric power system dynamics[M]. Academic Press, 1983.

[8] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
LU Qiang, SUN Yuan-zhang. Power system nonlinear control[M]. Beijing: Science Press, 1993.

[9] LU Qiang, SUN Yuan-zhang, MEI Sheng-wei. Nonlinear system control and power system dynamics[M]. Boston/Dordrecht/London: Kluwer Academic Publishers, 2001.

[10] 马进. 基于能量的电力系统暂态稳定分析与控制[D]. 北京: 清华大学电机工程与应用电子技术系, 2003.
MA Jin. Energy-Based Power System Transient Stability Analysis and Control. [D]. Beijing: Tsinghua University, 2003.

[11] 孙凯. 大型电网灾变下基于 OBDD 的搜索解列策略的三阶段方法 [D]. 北京: 清华大学自动化系, 2004
SUN Kai. An OBDD-based Three-phase Method for Searching for Splitting Strategies of Large-scale Power Networks against Blackouts. [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.

收稿日期: 2007-10-17

作者简介:

黄日星 (1974 -), 男, 工程师, 硕士, 主要从事电力系统分析和电力市场方面的研究。

李锐 (1973 -), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力系统运行与控制方面的研究。

胡伟 (1976 -), 男, 副教授, 博士, 主要从事电力系统分析与控制方面的研究。

(本文责任编辑 张亚拉)