

现代电力系统 保护与控制的协调

张大海
2016. 10

内 容

1. 世界大停电事故的启示
2. 我国电力系统“三道防线”
3. 现有保护与控制存在的问题
4. 保护与控制协调研究
5. 结论

1. 世界大停电事故的启示

美加大停电

- 时间：2003年8月14日 16:11
- 地点：美国8个州，加拿大2个省
- 系统失去61800MW的负荷
- 扰乱了5000万人的工作和生活
- 停电长达29小时
- 直接经济损失初估达300亿美元
- 有史以来、全球最大的一次停电

事故发展过程

★事故预备与发展期

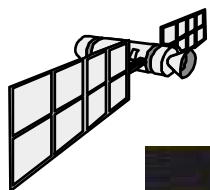


事故发展过程

★事故爆发期与恢复期

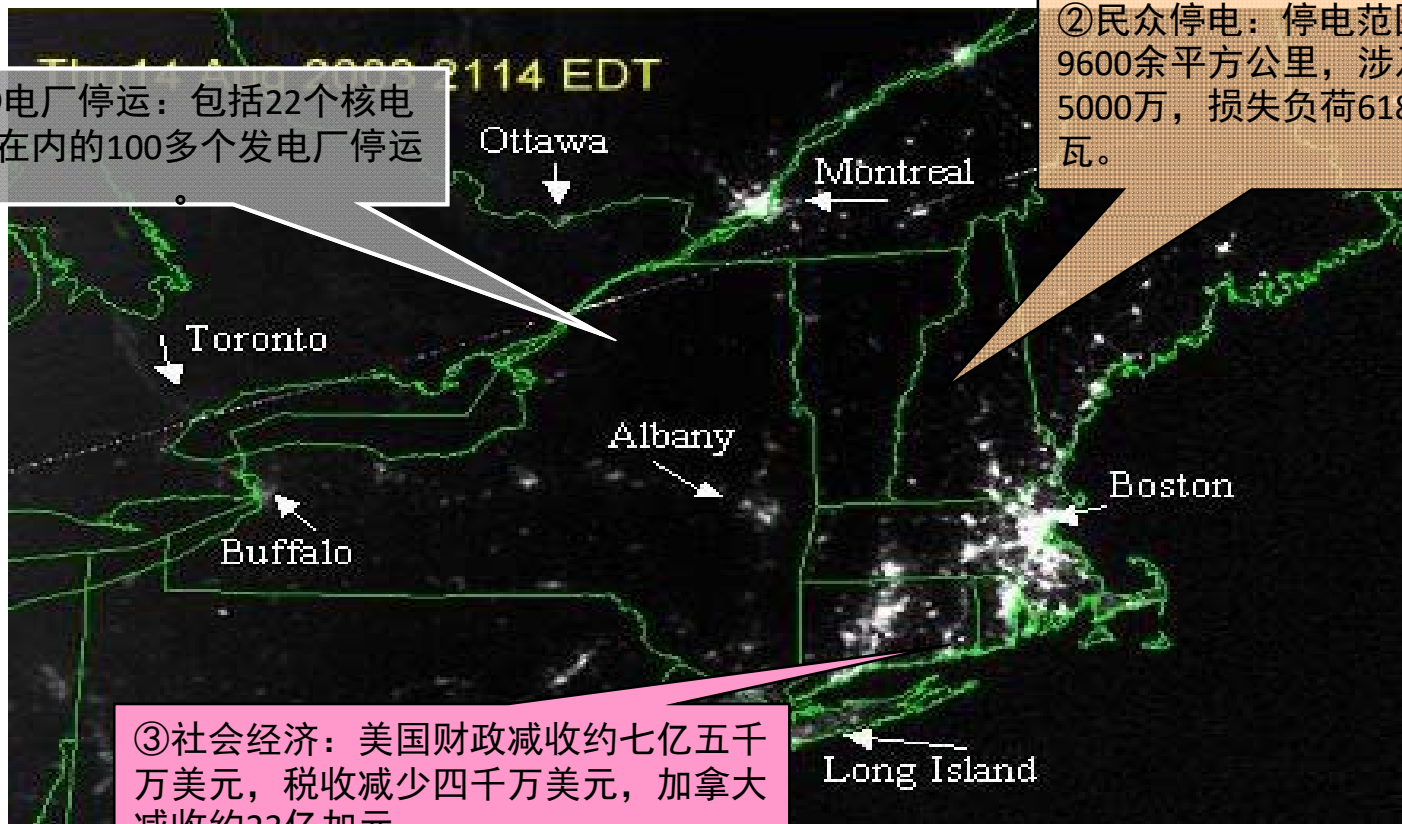


美加大停电造成的影响



①电厂停运：包括22个核电站在内的100多个发电厂停运

②民众停电：停电范围达9600余平方公里，涉及居民5000万，损失负荷6180万千瓦。



③社会经济：美国财政减收约七亿五千万美元，税收减少四千万美元，加拿大减收约23亿加元。

危害：“8.14美加大停电”对美加两国的国民经济、电力系统、社会稳定造成了巨大影响！

美加大停电原因

➤美加大停电的起因是俄亥俄州南北联络通道上一条345kV的支路跳闸，其输送的功率转移到相邻线路上，引起该支路长时间过负荷，支路过热并下垂，从而接触线下树木，造成支路短路跳闸。

➤此后，发生了一系列连锁反应。包括：多回输电线路跳开，潮流范围转移，系统发生摇摆和震荡，局部系统电压进一步降低，引起发电机组跳闸，使系统缺额增大，进一步发生电压崩溃，同时有更多的发电机和输电线路跳开，造成大面积停电的发生。

➤可见，单一故障》》潮流转移》》过负荷》》连锁跳闸

近年来世界大停电事故

发生时间	事故地区	造成后果
2003年8月14日	美国与加拿大	停电范围约9600平方英里，5000万人受影响，经济损失250亿~300亿美元。
2003年8月28日	伦敦	41万用户受影响，50万地铁乘客被困。
2005年5月25日	莫斯科	市内大约一半地区的工业、商业和交通陷入瘫痪，经济损失至少10亿美元。
2005年8月18日	印度尼西亚	约1亿人口受影响，仅雅加达纺织业损失就超过550亿印尼盾。
2005年9月12日	洛杉矶	引起交通堵塞，市区200万人受影响。
2006年11月4日	欧洲8国	德国、法国、荷兰、比利时、奥地利、意大利、西班牙、克罗地亚 约1000万人受影响，德国100多列次火车晚点两个多小时。
... ..		

中国大停电？

世界上共发生过25次负荷损失 ≥ 800 万千瓦的重大停电事故。在25次世界重大停电事故名单中，美国共有6次，累计负荷损失15142万千瓦，占据榜首。

中国电力容量现已居世界首位，电网规模世界第一。

2006年7月1日晚9时，华中电网两条并列运行的500千伏线路误动跳闸，负荷全部转到220千伏线路上，造成多台发电机组跳闸，河南省五市停电，湖北、湖南、江西等邻近省份也受到影响，华中全网失稳振荡。负荷损失380万千瓦，尚未达到重大停电事故标准。

美加大停电事故原因分析

事故原因分析

非直接原因：

大量机组相继跳闸加速了电压的崩溃，反过来讲电压降低过快导致机组跳闸。

主要原因：

北美电网东部地区环网潮流发生无任何预警的转向，大范围潮流转移导致的电压崩溃。

直接诱因：

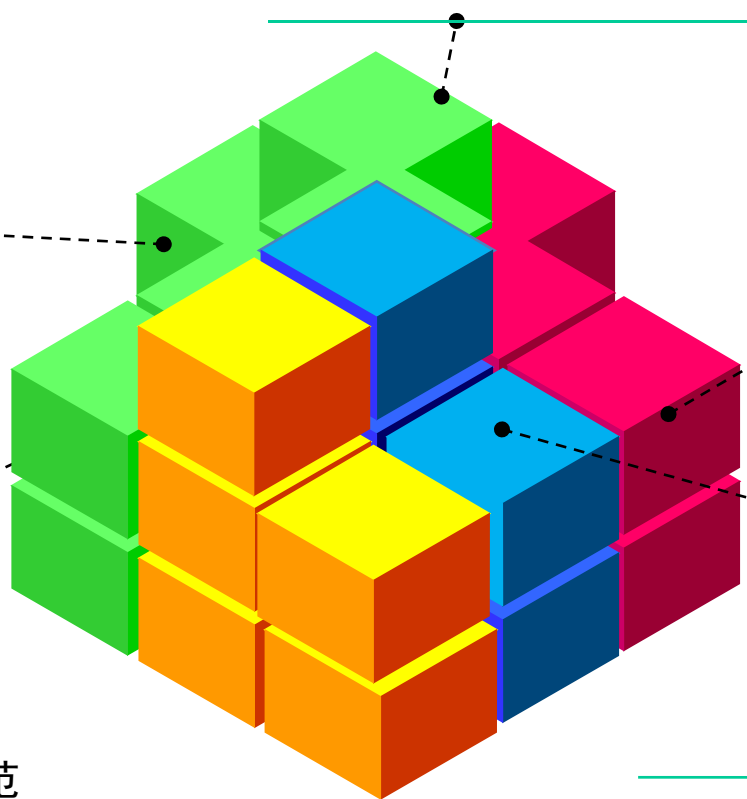
俄亥俄州南北通道上的多条线路相继跳闸是导致潮流大范围转移的直接诱因

电网内部原因：

- 调度缺乏信息交换
- 保护控制技术不完善
- 系统计算分析仿真不规范
- 电网不能以经济最大化为目标

间接原因：

国家对电力设施后期投入资金不同步，以致设备及线路老化，遇到紧急状况反应不灵敏。



美加大停电事故原因分析

- (1) 电网整体结构不合理：美国电网建设缺乏总体规划，高低压电磁环网运行；区域电网间信息交换较少，调度员无法监视跨区域电力系统系统全貌。
- (2) 继电保护定值不协调：美国继电保护距离三段定值不能区分线路短时过负荷，定值缺乏统一协调；保护装置的振荡闭锁功能不完善，当线路出现严重过载或系统发生振荡时会误跳闸，引发连锁反应。
- (3) 安稳控制装置的配置不完善：如过负荷控制、失步解列、低频低压解列、低压切负荷等配置不足或根本就没有，不能及时制止电网事故扩大。

美加大停电事故原因分析

(4) 调度过分依靠计算机系统，一旦计算机系统异常，造成信息不全、不可靠，电网调度就无所作为，陷于瘫痪状态。

(5) 电网运行追求高经济效益，送电接近输送极限，安全稳定裕度很小。一旦线路跳闸引起潮流转移时，就往往引起线路的严重过载，再加上上述原因，就容易发生一系列连锁反应，事故扩大。

(6) 按北美电力可靠性委员会（NERC）标准，“事故时互联电网不要解列，以获得相互支援”，致使电网各参与者在本次事故中未采取任何主动解列操作措施。对这项标准值得重新反思。

世界大停电反思

- 美加停电事件是一起由电网局部故障扩大到电网稳定破坏、电压崩溃、最后造成电网瓦解，引起大面积停电的严重恶性事故，波及面之广、影响之大是北美历史上没有过的，也是世界上从未有过的。
- 从保护控制的技术层面来看，美国电网结构复杂，运行方式多样，增加了电网保护、控制以及解列的难度。

世界大停电反思

➤由于保护都是基于本地量信息来判断是否动作，保护定值的整定不能够适应运行方式及运行状态的变化，不顾及支路断开后对整个系统造成的影响。所以事故中，因过负荷引起的后备保护动作无疑是加剧大停电事故的重要原因。

➤同时，保护与安全自动控制装置之间没有协调的配合，使得系统电压下降时，许多发电机组很快退出了运行，也加剧了电压崩溃的发生。

世界大停电反思

➤即使在强壮的网架结构下，也不能够完全避免系统在受到单一扰动的情況下，因潮流转移引起的过负荷可能导致的连锁跳闸事故的发生。

➤分析几年来世界大停电事故，很大一部分大停电事故（包括2005年莫斯科大停电，2006年西欧8国大停电）是由过负荷或单一故障引发的连锁跳闸事故发展而来。这种原因造成的大停电事故，如果在发展初期控制得当，是完全可以避免的。

2. 我国电力系统“三道防线”

《电力系统安全稳定导则》

- 1981年全国电网稳定会议颁发《电力系统安全稳定导则》。
- 2001版： DL755-2001 电力系统安全稳定导则（Guide on security and stability for power system）
- 《导则》规定了电网分层分区原则。
 - 应按照电网电压等级和供电区域合理分层、分区。
 - 合理分层，将不同规模的发电厂和负荷接到相适应的电压网络上；
 - 合理分区，以受端系统为核心，将外部电源连接到受端系统，形成一个供需基本平衡的区域，并经联络线与相邻区域相连。

《电力系统安全稳定导则》

《电力系统安全稳定导则》规定我国电力系统承受大扰动能力的安全稳定标准分为三级：

- 第一级标准：保持稳定运行和电网的正常供电
[单一故障（出现概率较高的故障）]；
- 第二级标准：保持稳定运行，但允许损失部分负荷
[单一严重故障（出现概率较低的故障）]；
- 第三级标准：当系统不能保持稳定运行时，必须防止系统崩溃并尽量减少负荷损失。
[多重严重故障（出现概率很低的故障）]。

“三道防线”

➤第一道防线：高速、准确地切除故障元件的继电保护和反应被保护设备运行异常的保护。

目的：不损失负荷，快速隔离故障；

➤第二道防线：保障电网安全运行的安全自动装置。

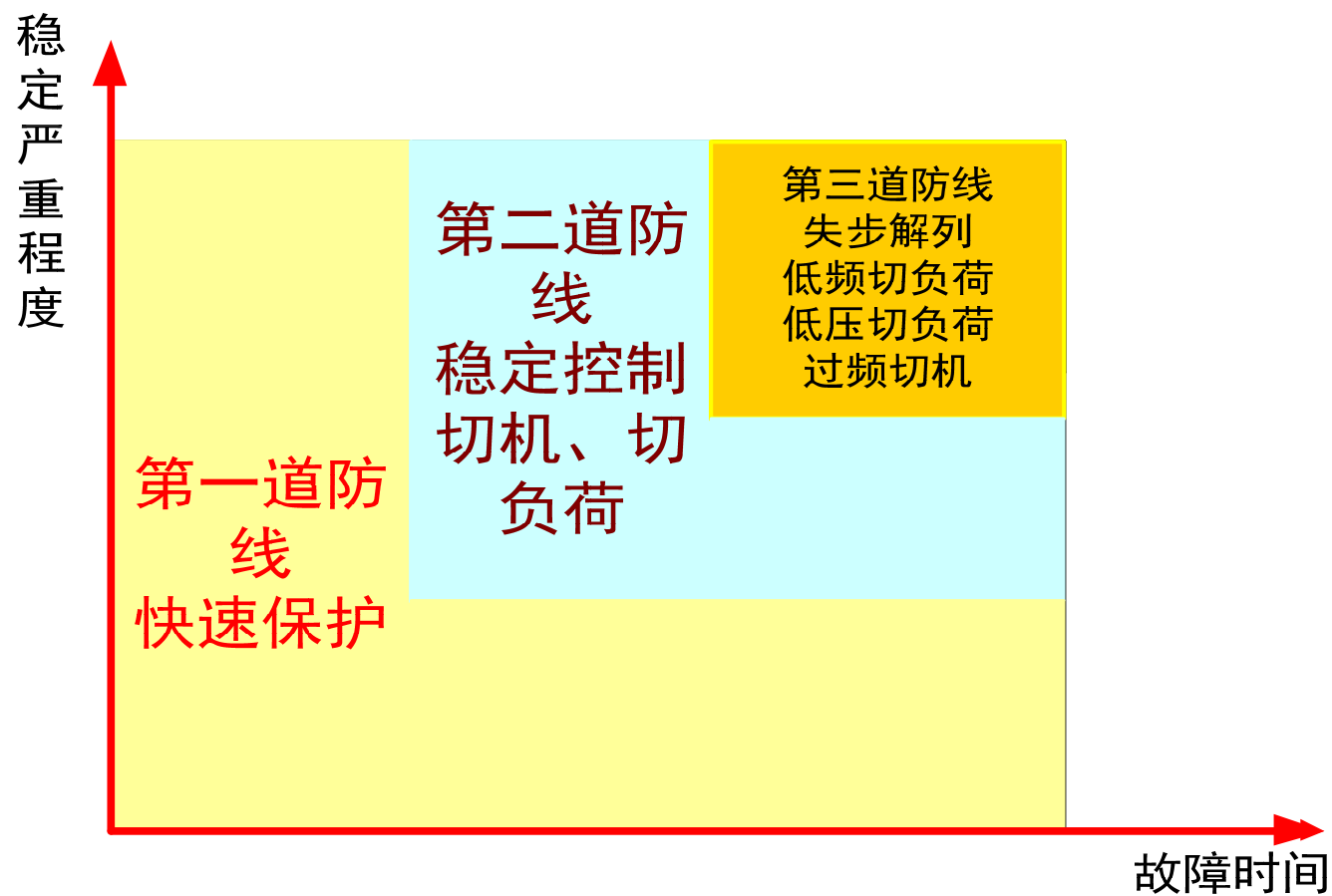
目的：允许损失少量负荷，避免元件过载、电网失稳；

➤第三道防线：失步解列与频率、电压控制。

目的：采取一切必要手段避免电网崩溃。

简单说，三道防线分别是：（1）继电保护（2）过载切机切负荷稳控装置（3）低频低压失步解列装置。

“三道防线”



3. 现有保护与控制存在的问题

我国保护设备正确动作率

表 8 2012—2013 年各电压等级保护设备正动率对比情况
Tab. 8 Protective relaying correct action rate comparison
of different voltage systems in 2012—2013

	1 000 kV 系统/%	750 kV 系统/%	500 kV 系统/%	330 kV 系统/%	220 kV 系统/%	总计/%
2012 年	100	99.04	99.74	100	99.95	99.89
2013 年	100	97.62	99.83	99.60	99.99	99.92
增幅	0	-1.42	0.09	-0.40	0.04	0.03

传统后备保护的局限性

现有电网中的后备保护仅反应保护安装处的信息，受电网拓扑连接关系与运行方式的影响。

为保证其可靠性，不得不按照最严酷的情况进行配置和整定；
为保证其选择性，不得不牺牲后备保护的快速性与灵敏性。

同时由于电网结构日趋复杂，就导致：

- 后备保护配合关系复杂，动作时间长。严重时有可能不满足系统稳定性所要求的极限切除时间，进而成为大电网的安全隐患。
- 后备保护配置与整定的难度大，且不能跟踪系统运行方式的变化，甚至可能出现保护失配或灵敏度不足的情况。
- 后备保护不能区分内部故障与故障切除后引起的潮流转移，这有可能导致重负荷情况下的后备保护连锁跳闸。

实际保护控制现状



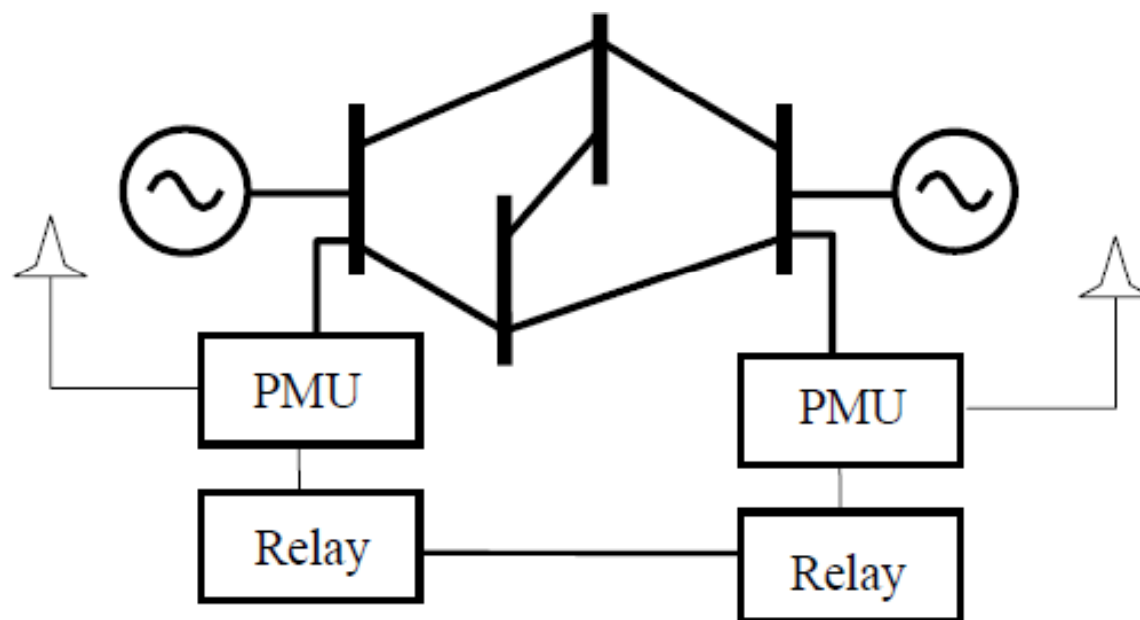
4. 保护与控制协调研究

保护与控制的协调

- （**必要性**）现有的保护控制系统的不足，要求我们采用基于广域信息的保护控制系统，保护与控制需要协调。
- （**可行性**）计算机和通信技术、信号处理技术的发展，为实现广域保护控制系统提供了物质基础。

广域保护的提出

- 广域保护（Wide Area Protection）的概念首次出现在由瑞典学者于1997年在IEEE上发表的Wide Areas Protection Against Voltage Collapse（广域保护应对电压崩溃）



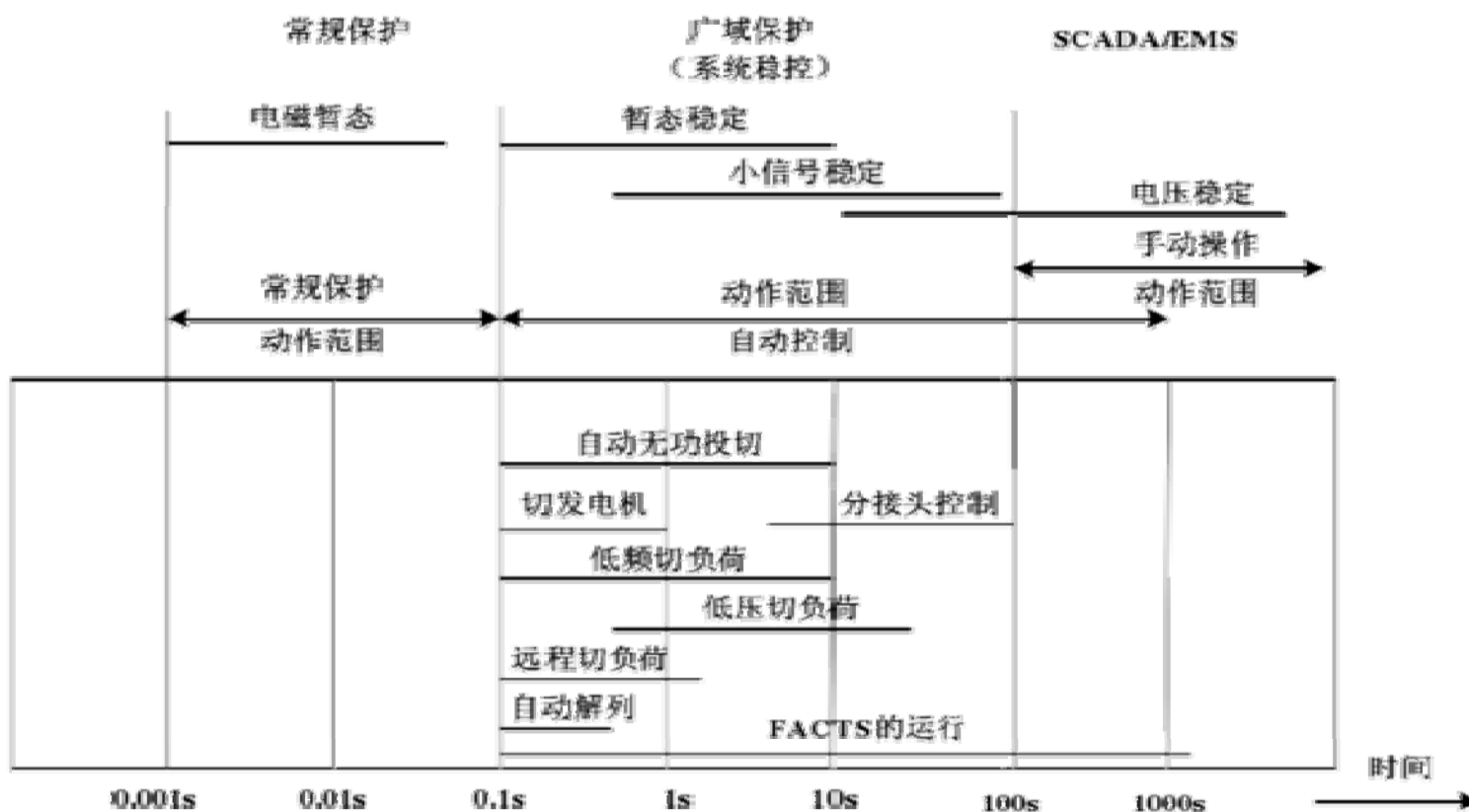
广域保护的定义

国际大电网会议(CIGRE)对广域保护的功能及控制手段等进行了定义：

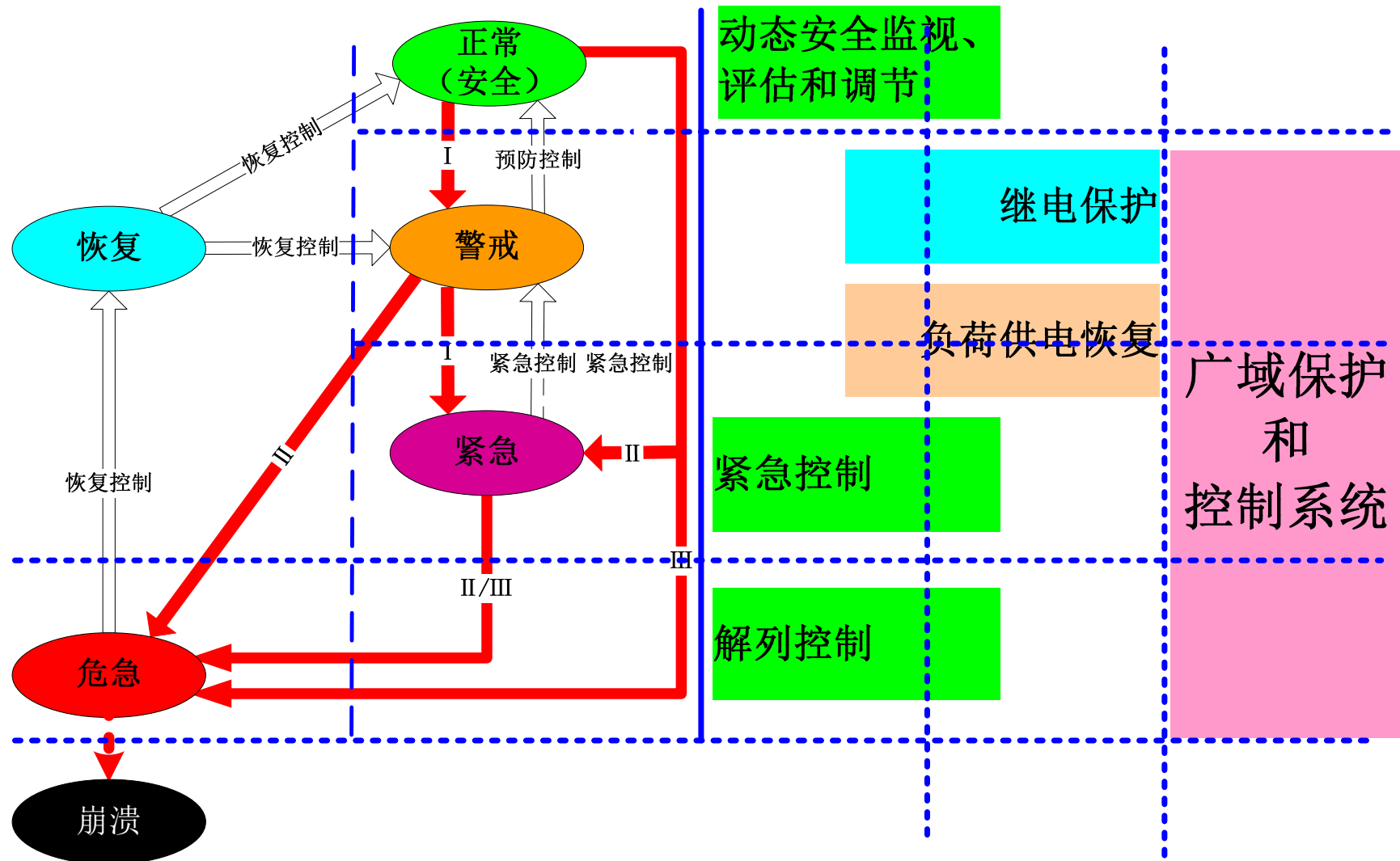
依赖电力系统多点的信息，对故障进行快速、可靠、精确的切除，同时分析故障切除对系统安全稳定运行的影响，并采取相应的控制措施，可提高输电线可用容量或系统可靠性，这种同时实现继电保护和自动装置功能的系统，称为广域保护系统（ Wide Area Protection System, 简称WAPS ）。

国外认定的广域保护的功能范畴

- 国际大电网会议对广域保护的功能和控制目标做了一个定义。可以看出广域保护的动作时间是0.1s~100s



广域保护控制范畴



广域保护系统的功能组成

以广域信息的采集、传送、分析和使用为主线，广域保护系统的构成基本上可以分为三大部分。

- **第一部分是电力系统实时动态监测系统。**由安装在各变电站的同步相量测量装置（PMU）之间相互通讯，及与安装在电力系统调度中心、变电站或发电厂的主站通讯构成电网广域测量系统（WAMS）实现对地域广阔的电力系统运行状态的监测和分析。

广域保护系统的功能组成

- 第二部分包括广域继电保护算法和广域自动控制策略，安装在各变电站的PMU相互通讯，就地实现常规保护功能，且主站根据采集到的电网中分布的各变电站PMU实时测量数据，检测故障，分析扰动，提出投切线路、负荷和机组等控制策略。
- 第三部分是电力系统实时控制系统，由安装在各变电站的自动控制装置与安装在调度的控制中心联网，实现广域自动控制策略。

技术支持

研究和实施广域保护所需技术包括：

- 继电保护技术
- 安全稳定控制技术
- 同步测量技术（GPS, PMU...）
- 网络通信技术（高速实时通信）

技术支撑

一种广域通信方式 SDH网络

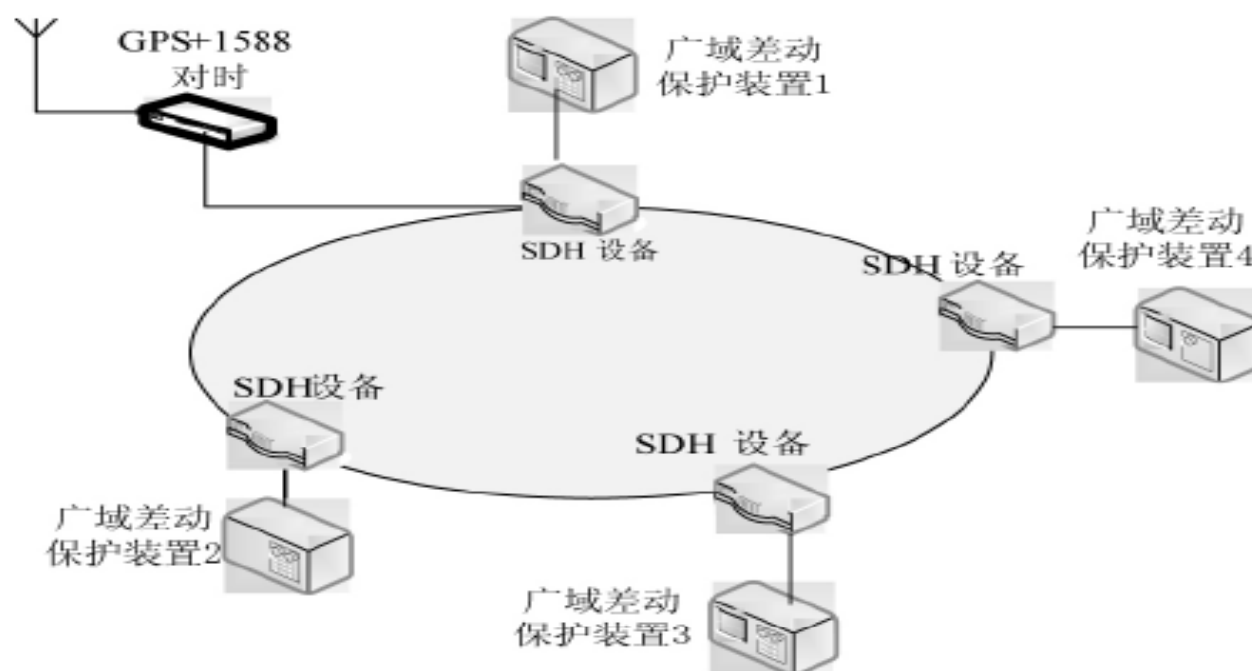


图 1 广域差动保护系统

广域后备保护定义

广域后备保护是一套完整的保护方案，它获取电网多点信息，利用这些信息判断故障元件并隔离，同时考虑故障切除之后对系统稳定性带来的影响，以防止保护动作导致系统崩溃。在广域保护中，继电保护和自动控制装置融为一体，相互配合，协调动作，保证系统安全稳定运行。

广域后备保护意义

现有后备保护配置仅基于本地量信息完成后备保护功能，容易受过负荷等不正常运行状态的影响，在非故障条件下也可能动作。线路过载情况下可通过切机切负荷等控制措施来减轻或消除过载状态，但是需要较大延时来完成控制策略。

广域后备保护根据电网相关区域内保护、开关动作状态或电流/电压等广域信息判断故障元件。广域后备保护系统在广域通信网络的支持下采集空间多点广域信息，通过智能优化和信息处理技术进行综合决策；**由于明确故障线路和保护、开关状态及不需要和传统后备保护进行时限配合**，所以能实现快速的和最小范围的故障隔离。

广域保护研究进展

自适应保护算法

潮流转移识别算法

风电场故障与潮流波动辨识

区域电网智能过负荷保护

基于广域网的自适应保护算法

开关变位自适应，就是当开关变位后，通过拓扑分析得到电网新拓扑结构，再根据自适应保护算法，按照当前的电网拓扑计算当前运行方式下的线路保护定值。

线路故障自适应整定算法是当线路故障时的实时整定算法，由线路故障启动保护算法，采用故障时的实时参数进行自适应整定计算。不仅结合了当前的运行方式，而且结合故障参数进行分支系数的自适应计算。

基于广域网的潮流转移识别算法

电力系统的潮流转移通常发生在网络拓扑结构发生变化之后，当系统中某条联络线因故障被切除后，其上的潮流将被转移到系统中其他正常运行的联络线上，引起正常线路的过载。

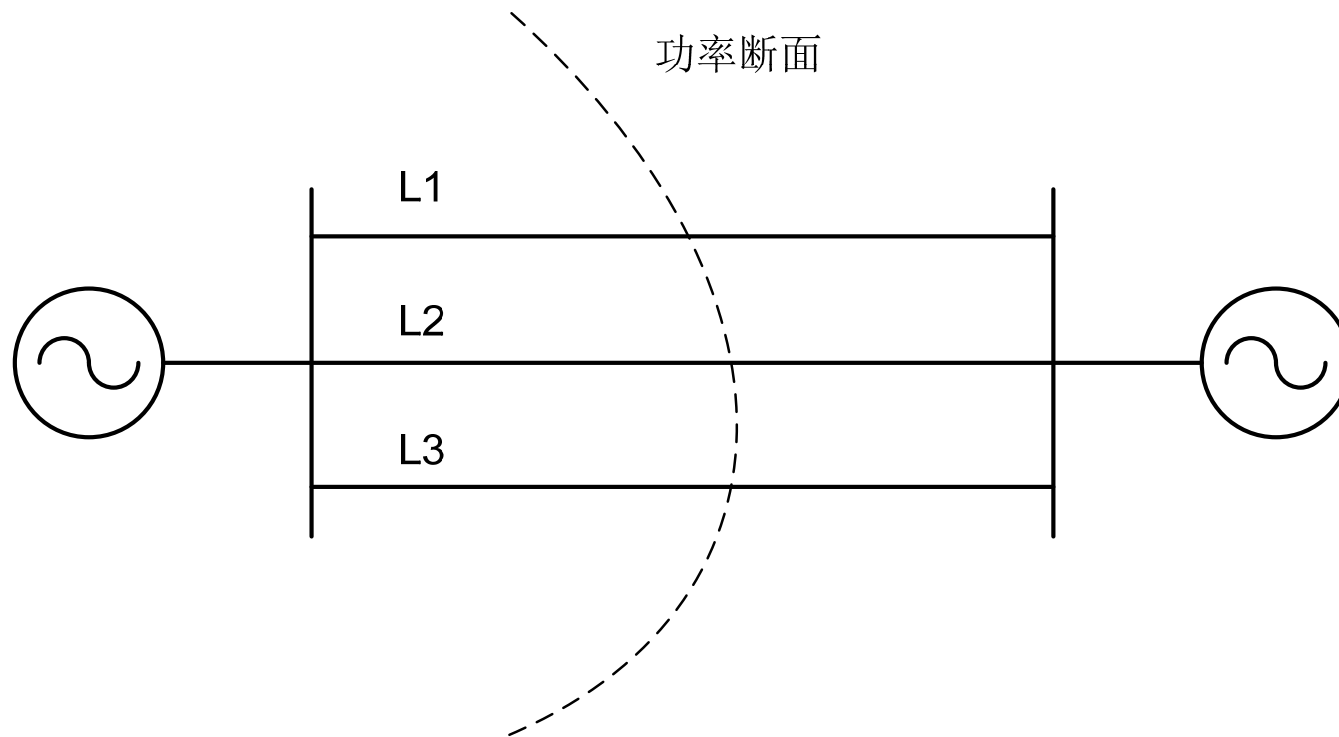
基于故障前在线实时测量潮流分布和采用估算故障后的潮流分布，并通过故障后估算潮流与实时测量潮流的比较可以判断这些线路的过载是否是由于潮流转移所引起。若发生了潮流转移，就应当在线路未达到其热稳定极限前正确地闭锁保护，然后采取相应的控制措施。

风电场故障与潮流波动辨识

- 故障导致的电压、电流、潮流变化迅速，而风速变化导致的潮流变换缓慢。
- 故障后出现负序零序等分量，而风速变化导致潮流变化但没有负序零序等分量。

区域电网智能过负荷保护

- 为避免连锁故障的发生，智能保护在某条线路跳闸后，自动提高同一功率断面的其他线路的过负荷电流定值和时间定值，降低过负荷保护在此情况下的过负荷的灵敏度。



5. 结论

世界大停电事故的教训，表明传统电力系统中保护与控制分离，保护完全独立于控制的运行/管理方式需要改善。

保护与控制需要相互协调配合。

主保护对于速动性有严格要求，而现有技术在通信速度和信息处理能力方面仍有局限性。

后备保护中引入广域信息，在完成隔离故障、保护设备安全等传统任务的同时，顾及保护动作后整个系统的稳定，与安全自动装置配合，有效预防大电网连锁跳闸故障的发生，是未来重要研究方向。