



坚强智能电网的保护与控制

报告人

张保会

西安交通大学

2013/04/22

目 录

- 一、坚强智能电网对保护和控制的新要求
- 二、继电保护面临的问题与实现条件的拓展
- 三、减少故障对电网的冲击—故障的超高速甄别
- 四、增强电网的强壮性—保护配置、配合的发展
- 五、提高电网的自愈性—保护功能的发展
- 六、结论

一、智能电网对保护和控制的新要求

智能电网 (Smart Grid) 的定义:

到目前为止，智能电网尚无完全相同的定义。

构成：一般指以物理电网为基础，将现代先进的传感测量技术、通讯技术、信息技术、计算机技术和控制技术与物理电网高度集成而形成的新型电网。

目标：它以充分满足用户对电力的需求和优化资源配置，确保电力供应的安全性、可靠性和经济性，满足环保约束、保证电能质量、适应电力市场化发展等为目的，实现对用户可靠、经济、清洁、互动的电力服务。

智能电网不是一个全新的概念，它是优化能源生态平衡、提高利用效率、降低大气环境污染，和谐利用电能的总称。

一、智能电网对保护和控制的 new 要求

中国—坚强的智能电网（Strong&Smart Grid）

- ★ **总体发展目标：**以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强电网为基础，利用先进的通信、信息和控制技术，构建以信息化、数字化、自动化、互动化为特征的自主创新、国际领先的坚强智能电网。
- ★ **基本内涵：**坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动。
- ★ **技术特征：**技术上实现信息化、数字化、自动化、互动化；管理上实现集团化、集约化、精益化、标准化。

一、智能电网对保护和控制的新要求

坚强的智能电网基本内涵

◆ 坚强 (Robust)

在电网发生大扰动和故障时，电网仍能保持对用户的供电能力，而不发生大面积的停电事故；在自然灾害和极端气候条件下、或人为的外力破坏下仍能保证电网的安全运行；

◆ 自愈 (Self-Healing)

具有实时、在线连续的安全评估和分析能力，强大的预警控制系统和预防控制能力，自动故障诊断、故障隔离和系统自我恢复的能力。

◆ 兼容 (Compatible)

能支持可再生能源的正确、合理地接入，适应分布式发电和微电网的接入，能使需求侧管理的功能更加完善和提高，实现与用户的交互和高效互动。

一、智能电网对保护和控制的新要求

◆ 经济 (Economical)

支持电力市场和电力交易的有效开展，实现资源的合理配置，降低电网损耗，提高能源利用效率。

◆ 集成 (Integrated)

实现电网信息的高度集成和共享，采用统一的平台和模型，实现标准化、规范化和精细化的管理。

◆ 优化 (Optimized)

优化资产的利用，降低投资成本和运行维护成本。

一、智能电网对保护和控制的新的要求

保护对智能电网可作的新贡献：

- 减少故障发生，发展“自愈”功能—预保护、保护一体化。
- 减少故障对系统的冲击，增强安全性—加快故障切除。
- 增强网架强壮性，保护与自动装置配合—减少和优化线路跳闸策略。
- 减少故障损失，避免大停电—增强全网跳闸协调控制能力。
- 实施闭环控制，暂态预测与控制--减少故障发展为事故的概率。
- 避免大停电事故，自适应的失步解列与频率电压控制。

二、我国继电保护面临的问题与实现条件

电力系统对保护要求的提高是保护发展的直接推动力

- 为发挥特高压网架输电能力，要求故障切除时间越短越好。
- 同塔多回线路架设，要求故障后尽可能多的保留输电能力。
- 网架的复杂性，使得阶段式原理的后备保护难于保证选择性。
- 运行方式的多变性，使得连锁过载跳闸、暂态不稳定引发大停电。
- 网架互联增强，多区域间失步后的有效解列非单个继电器可以完成。
- 单台设备容量近百万千瓦，故障切除对系统影响极大要求预知检修。

二、我国继电保护面临的问题与实现条件

实现技术和条件的发展，奠定保护发展的基础

- ◆ 高速的数字采集与处理芯片发展，采集、处理暂态信号不再困难。
- ◆ 小波等非周期信号分析算法发展，使得提取暂态量特征更为方便。
- ◆ 数字化变电站、光通信网的普及，使得获取局域、广域实时信息容易。
- ◆ 同步相量PMU装置、WAMS系统，使广域动态相量信息可以使用。

实现条件的拓展，使得继电保护“只能用被保护元件的故障工频信息”，切除故障元件。向“可用被保护元件的故障全信息及相关网络信息”，切除故障元件并尽可能保障剩余网络安全的方向发展。

二、我国继电保护面临的问题与实现条件

- ◆ 快速切除故障元件的主保护是不需要广域信息的；

被保护的目标是单一设备，使用本设备的信息判别故障已经足够了；

局域信息将使后备保护的原理与配置发生重大变化！

- ◆ 广域信息下的集中协调控制系统是不可能取代分散安装的继电保护装置的。

主保护的動作速度要求极高，广域信息速度不够；

越是简单越可靠，广域信息的可靠性难于满足保护要求；

- ◆ 具备广域动态运行信息将使保障整个电力系统安全的安全自动装置防线的水平发生“质”的提高。

三、减少故障对电网的冲击—故障的超高速甄别

电压等级越高，故障产生的不平衡功率越大。

$$\Delta P = P_T - P_e = P_T - (aU^2 + bU + c)$$

故障切除的越快，故障电流对设备的损害越小。

故障切除的越快，故障产生的不平衡能量越小。

$$\Delta A = \int_0^{t_c} \Delta P dt$$

加快故障的切除可以减小低电压的时间，减少系统的不平衡能量，

是提高电网坚强性、安全性的最经济、有效的手段！

加快故障甄别是实现快速切除故障的基础。

三、减少故障对电网的冲击—故障的超高速甄别

1、超高压交流输电线路暂态量保护

利用区内外故障时电压、电流高频分量在幅值和方向上的差异，构成区内外故障的区分。

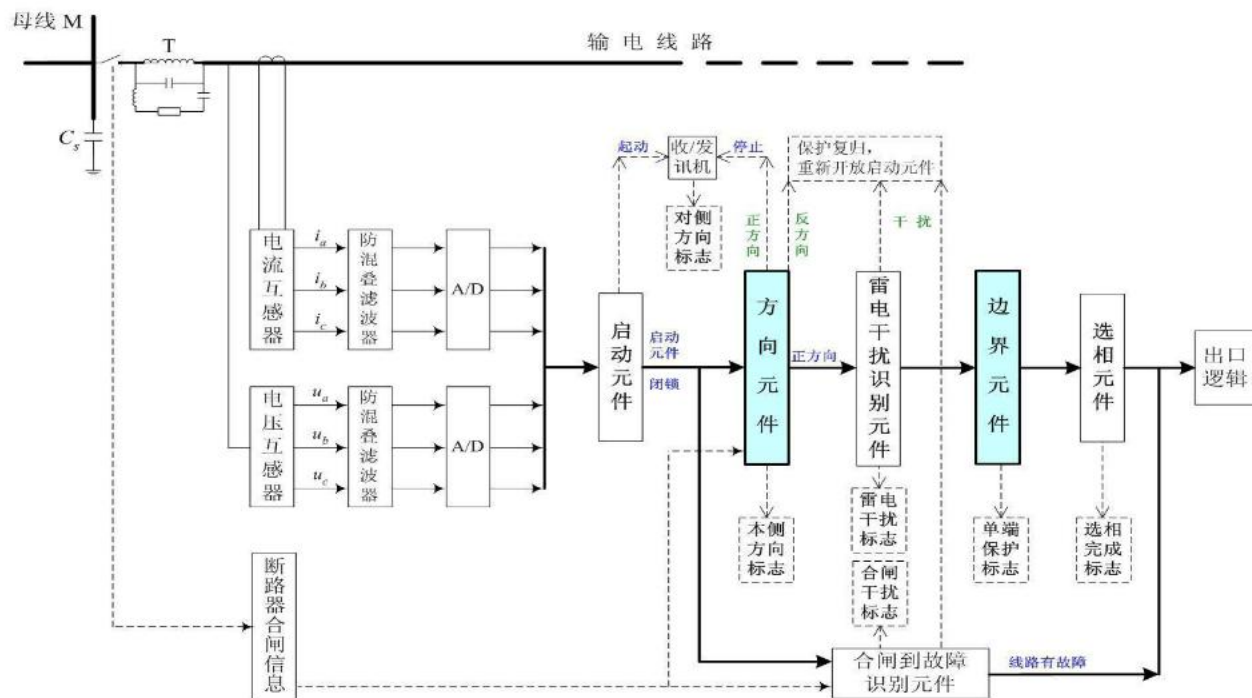
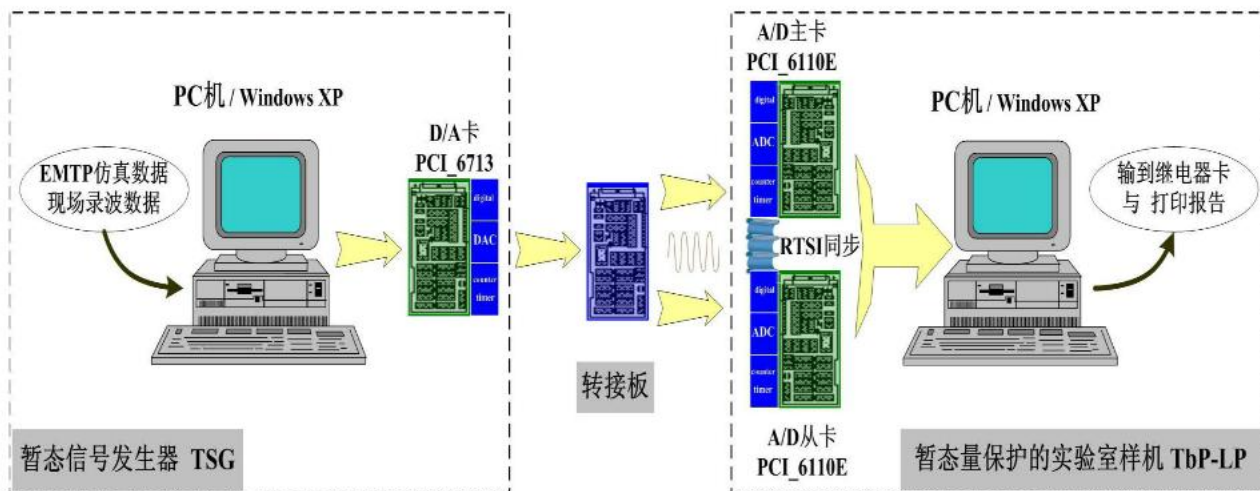


Fig. 1 Scheme chart of transient-based protection in EHV transmission system

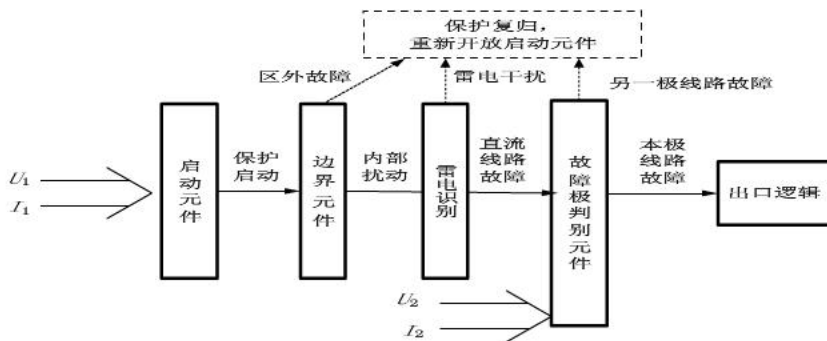
超高压交流输电线路暂态量保护模拟装置试验



4000次以上实时试验，完成一次保护需要乘法约**34728**次、加法约**31785**次，暂态量保护样机能够在不超过**4ms**内全部正确判别出故障，性能稳定。

2、超高压直流输电线路单端速动保护

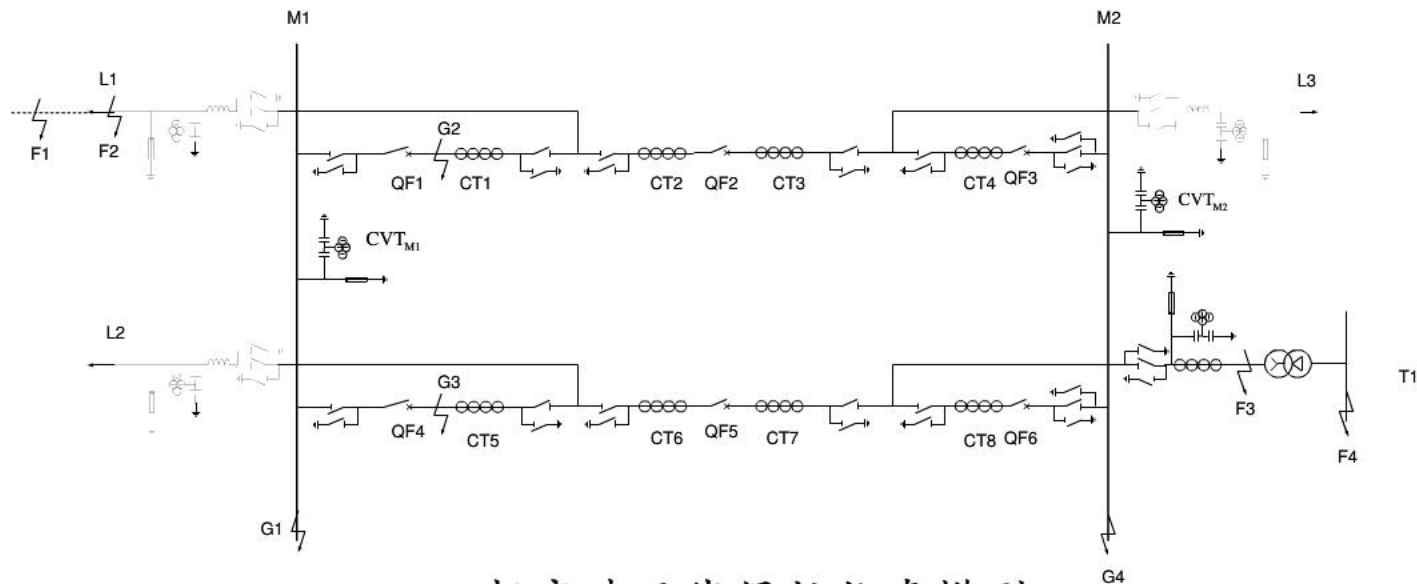
直流输电线路的两端均加装直流滤波器组及平波电抗器，它们构成了直流输电线路高频暂态量的天然“边界”。



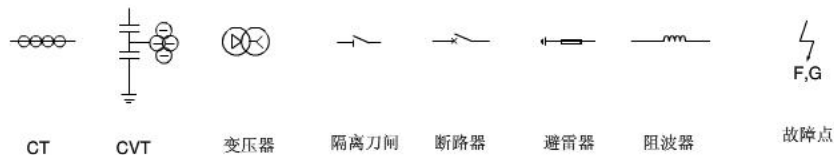
直流线路保护框图

保护采样率为**100kHz**，采用**db3**小波变换，整套保护需要约**5760**次乘法和**4800**次加法，用**C32**系列**DSP**运算时间不超过**300μs**，取**1ms**的数据窗，整套保护动作小于**2ms**。经**500Ω**大过渡电阻接地末端（逆变侧）接地，保护灵敏动作（大于门槛**10**倍），不需要定值计算。而利用电压、电流变化率的保护在**300Ω**中点短路已经拒动。

3、超高速母线保护



超高速母线保护仿真模型



超高速母线保护原理仿真

保护采样频率**400kHz/s**，选用以**4阶B-样条**导数函数作基小波的二进小波变换。使用相模变换，三个模量中至少两个模量满足判据要求。

行波电流极性比较式

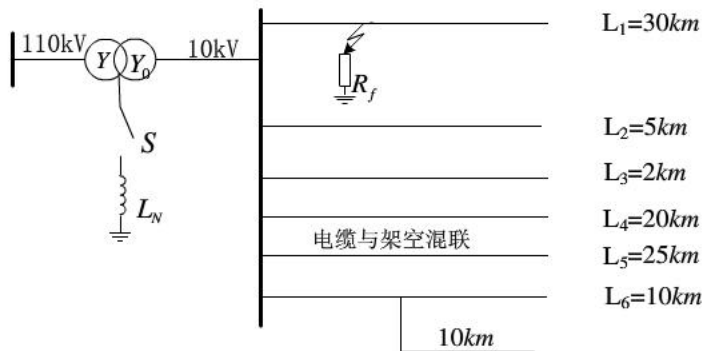
行波功率方向比较式

行波电流差动

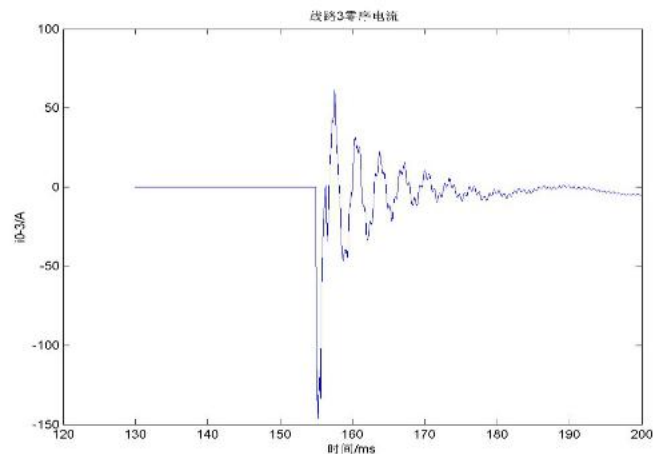
都能够在故障后**2ms**的时间内判出区内外故障。

变压器支路行波电流很小，影响前两个判据可靠性。

4、小电流接地系统单相接地选线装置研究



配电网示意图



故障线路（短线）零序电流

利用暂态电容电流最大可达稳态电容电流十几到几十倍数且不受消弧线圈补偿作用影响的特点，克服被测电流变化太小、特征提取的困难。装置选线正确率**100%**。

四、增强电网的强壮性—保护配置配合的发展

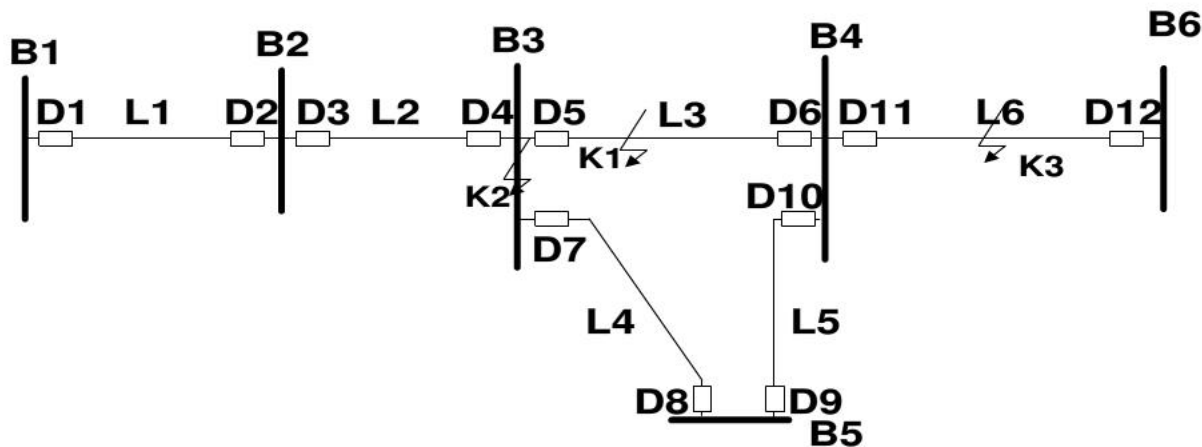
- 保护最小范围内切除故障的输变电元件是保证故障切除后系统强壮性的最直接的手段。原有后备保护的配置、配合可能大范围切除非故障元件，降低网络的强壮性和扩大停电范围。
- 同杆双回线主保护与重合闸配合没有保证故障切除后剩余系统联系最紧密。
- 主保护与重合闸配合可能使系统遭受二次故障冲击，降低系统的稳定性和安全性。

四、增强电网的强壮性—保护配置配合的发展

1、变电站集中式后备保护

每个被保护元件只配主保护，取消元件后备保护。

变电站配备集中式后备保护。对本变电站所有元件起近后备、开关失灵保护作用，并对相邻变电站起远后备保护作用。利用本站信息及相邻站状态信息。



变电站集中式后备保护的原理与技术

- 采用多重容错原理，保证高度可靠性。
- 采用扩大的方向比较、方向距离比较判定变电站直接连接元件范围内故障，再用方向、距离选出故障元件，实现近后备；
- 利用相邻站的命令完成远后备；
- 用主保护、后备保护出口及状态量判别开关失灵；
- 利用多色**petri**网搜索停电范围最小的跳闸断路器。
- 也可以采用扩大的电流差动原理，但需要远方更多的同步数据。

减少配置，具有绝对选择性保护原理，动作速度快、免整定配合，适应母线运行方式变化、保证跳闸范围最小。

L3故障D5失效，保护正确动作

保护线路	保护单元	判别结果	A_F	F_{out}	决策结果
L1	D1	0/+1	0	-1	正常
	D2	0/-1	-1		
L2	D3	1/+1	1	0	正常
	D4	0/-1	-1		
L3	D5	0/0	0	1	疑似故障
	D6	1/+1	1		
L4	D7	0/-1	-1	0	正常
	D8	1/+1	1		
L5	D9	0/+1	0	-1	正常
	D10	0/-1	-1		
L6	D11	0/-1	-1	-1	正常
	D12	0/+1	0		

任一元件的误动、拒动或信息丢失，不影响保护的
正确动作。

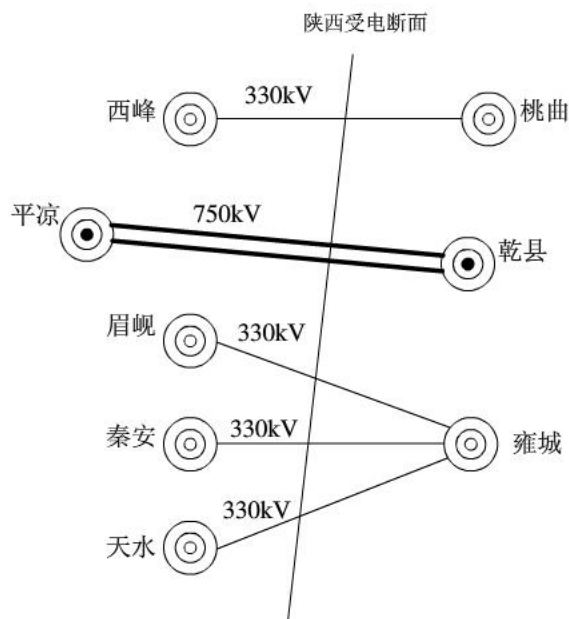
A_F

高容错性保证可靠性：

- A_F 方向元件和距离元件冗余运算（**1** 正向、内，**-1** 反向、外，**0** 其它）
- F_{out} 被保护元件各侧故障信息冗余计算（**=2** 故障线，**=1** 疑似故障，**=0** 非）
- 保护范围内所有元件故障冗余判别

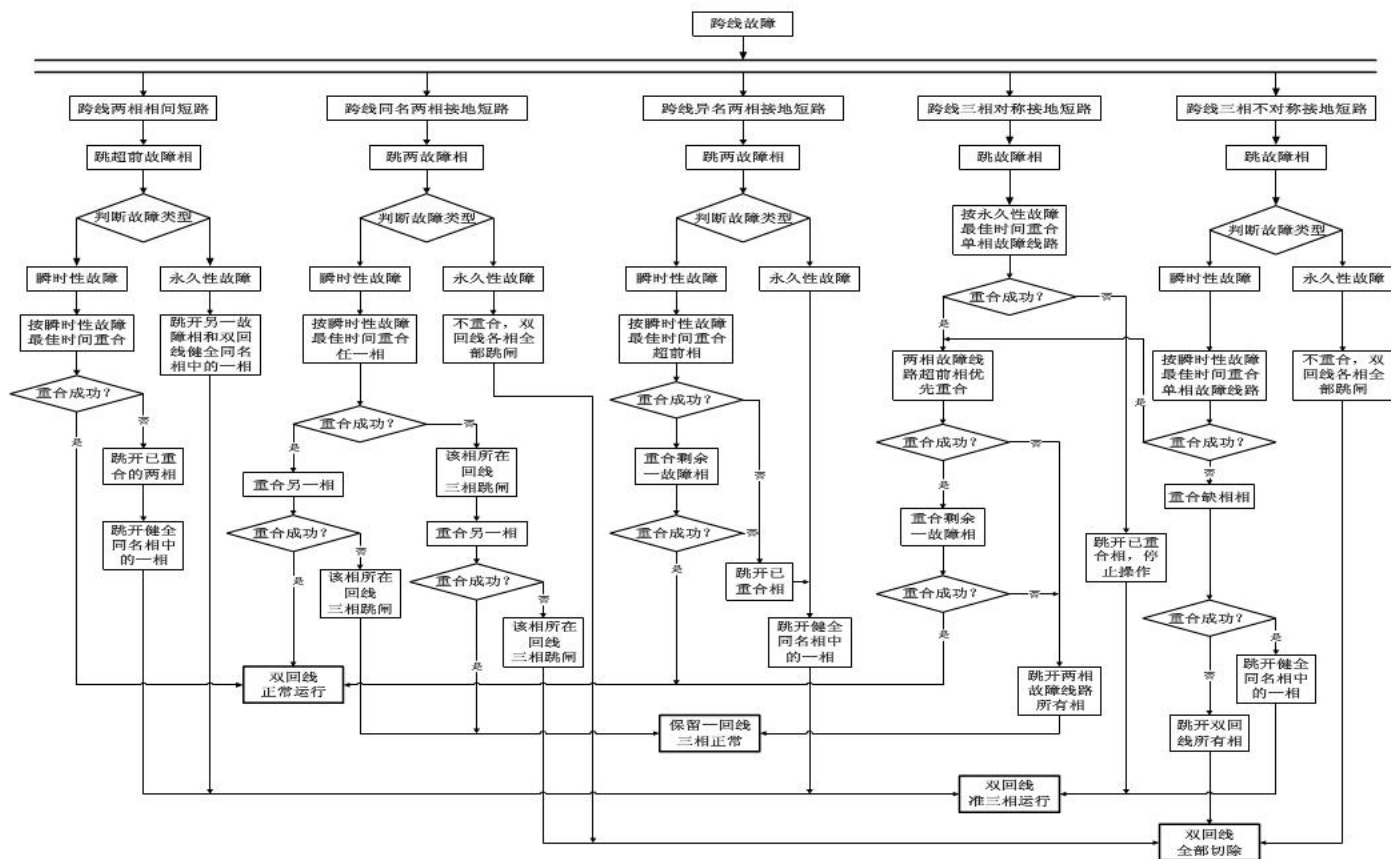
2、同塔双回线六相综合重合闸

输电断面功率在（2141—4799）MW变化时，同塔双回的输电功率占52%，为提高暂稳极限，提出六相综合重合闸方案。核心是：发生永久跨线故障后，保留准三相运行。



重合方案	暂态稳定极限(MW)	提高百分比
原重合方案	3000	53.3%
六相综合重合方案	4600	

同塔双回线六相综合重合闸方案跨线故障处理部分



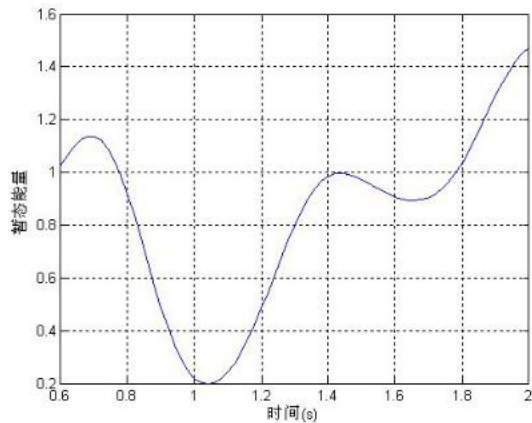
3、最佳重合时间整定

永久性故障时，在 t_h 时刻重合，在 t_{cc} 时刻断路器再次跳开，使跳开后系统角度摇摆最小的条件表示为：

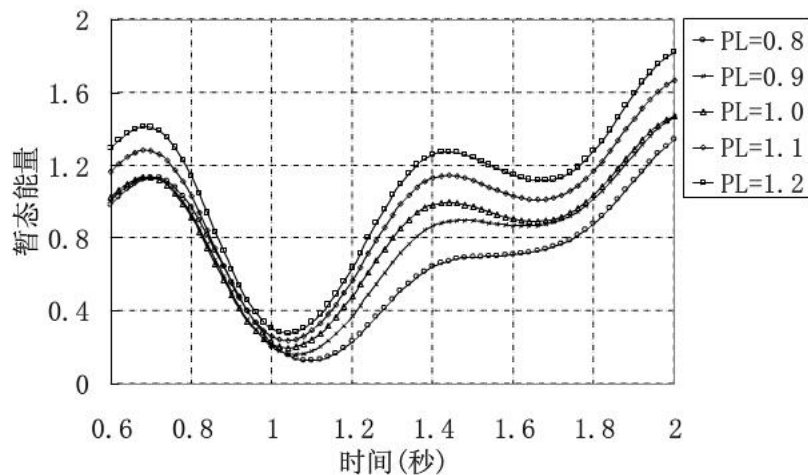
$$\min \left[\sum_{i=1}^n M_i \hat{\omega}_{ith} \Delta \omega_i + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i (\Delta \omega_i)^2 + \sum_{i=1}^n (P_i \theta_{ith} - P_i' \theta_{itcc}) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (C_{ij} \cos \theta_{ijth} - C_{ij}' \cos \theta_{ijtcc}) \right]$$

编制专门的稳定计算的数值积分计算程序计算系统的暂态能量，以确定最佳的重合时间。

能量曲线与最佳重合时间



单相重合闸用最佳时间重合，可以使所对应故障的暂稳极限提高**5%—11%**。若三相重合闸，提高暂稳极限的幅度更大。



最佳时间受故障点距离、传输功率和保护动作时间影响很小。

暂态能量随重合时间变化是连续的，离线计算的最佳重合时间可以应用于实际。

五、提高电网的自愈性—保护功能的发展

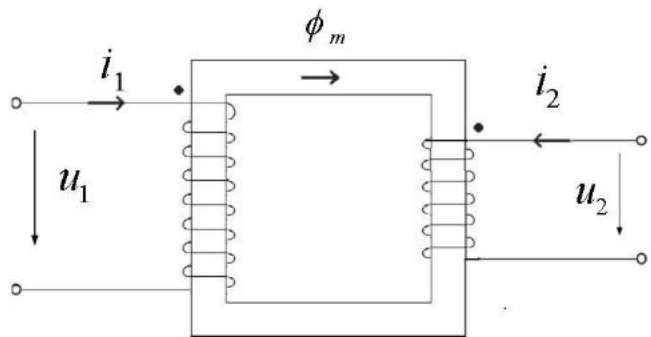
对于集中参数的发电机、变压器等，短路往往是绝缘下降、冲击积累后发生的，将保护的功能由切除故障，发展到减少故障的发生，使得电网更具有“自愈”能力。

保护动作后主要是切除故障或不正常的元件，并没有考虑剩余网络的安全性。发展既要消除当前的故障或不正常，又不会引起新的不安全，需要保护与安全自动装置的紧密配合。

控制故障冲击后系统尽快进入新的稳定运行状态，发展稳定性紧急控制系统、失步解列控制系统，是提高智能电网自愈性的有效手段。

1、变压器绕组变形检测与保护一体化

变压器在运输、外部故障冲击后绕组变形是造成内部短路的重要原因，实时检测变形程度报警可以减少内部故障。绕组变形时漏电感变化，内部短路时漏电感也变化，而涌流与外部故障时它不变化。



$$u_1 = r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\phi_m}{dt}$$
$$u_2 = r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + N_2 \frac{d\phi_m}{dt}$$

$$\int_{t_0}^{t_1} (u_1 - r_1 i_1 - L_1 \frac{di_1}{dt}) dt - n_B \int_{t_0}^{t_1} (u_2 - r_2 i_2 - L_2 \frac{di_2}{dt}) dt = 0$$

变压器绕组变形检测与保护的配合

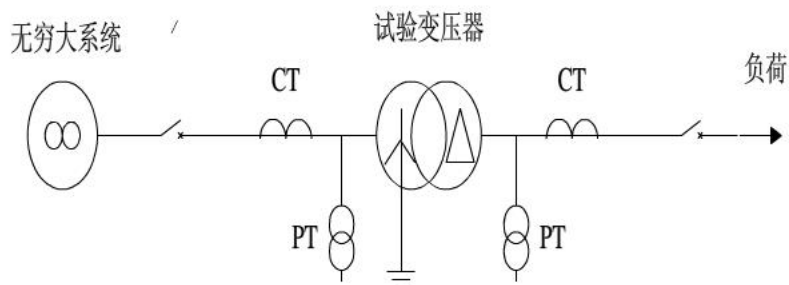
在变压器正常运行和外部故障切除后依据实测的电压、电流根据上式辨识漏电感**L1**、**L2**参数，与出厂时的值、上次辨识值比较，当变化较大时报警、维修，减少故障。

每次辨识后更新方程中的漏感参数，测量更新门槛值。

故障检出后计算保护判据（方程的不平衡量），大于门槛判为内部故障，保护数据窗宽可以自由设定。

外部故障后参数更新提高了保护的灵敏度。

保护实验



三单相变压器组联结为**Y/11**接法。

单相参数为：容量**2kVA**，电压**=1000/220V**，空载电流为**1.2%**，

空载损耗为**0.9%**；短路电压为**12.5%**，短路损耗**1%**。每周波采样**200**个点。

内部匝间**2.7%**短路有足够灵敏度，电阻**50**欧接地、相间短路足够灵敏，涌流不起动。

2、输电断面安全性保护—过负荷保护的功能发展

为了减少输电断面连锁过载跳闸造成的灾难性事故，不是停用线路过负荷保护和距离三段，而是发展和协调保护出口后的控制措施。

控制措施：当线路过载保护动作后，若切除后不会引起新的线路过载则切除，若会引起新的线路过载，则采取紧急控制在过载跳闸延时间内降至安全域内。

起动与协调：线路过载保护起动信号速送控制中心，起动输电断面安全性保护计算，若会引起连锁过载则执行紧急控制，消除过载。

输电断面安全性保护的关键技术

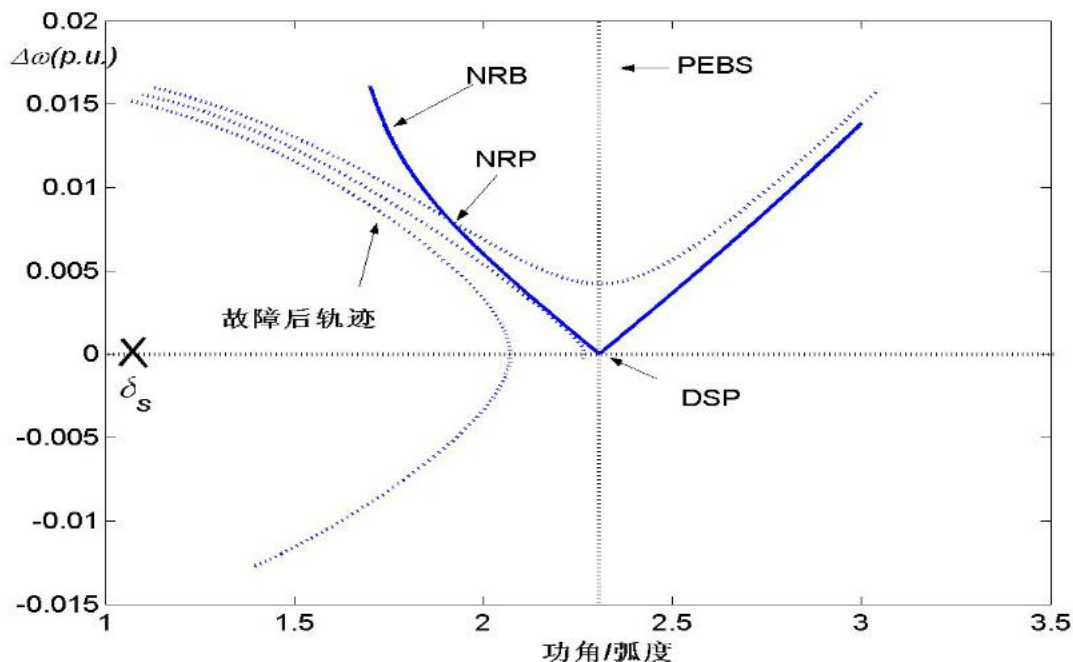
输电断面安全性保护的实时控制要求将过载线路负荷在延时跳闸的时限内降下来，使过负荷保护返回，算法快速性成为关键。

- 1) 输电断面在线搜索：减少估算过载线开断后承担潮流转移线路的时间。
- 2) 过载线路跳闸后是否造成输电断面内其他线路过载的预测。
- 3) 消除本线路过载并不会造成其它线路过载的控制方案制定。

对某省网（节点511个，不接地支路数725条）的计算，起动后可在200ms内给出消除过载控制方案。

3. 基于轨迹信息的暂态不稳定性预测与闭环控制

利用**WAMS**信息预测暂态不稳定，采取紧急控制阻止系统失步，提高系统自愈性



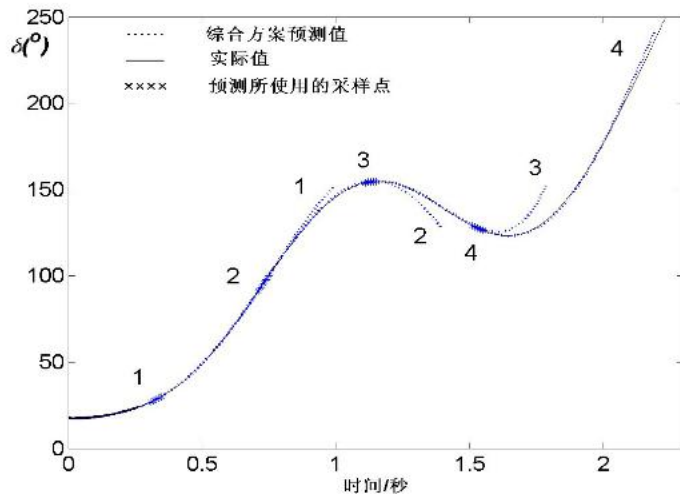
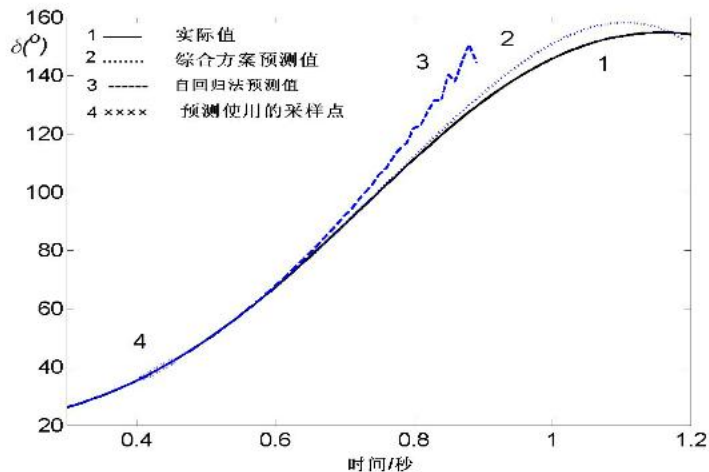
NRP拐点，**NRB**不返回边界，**DSP**不稳定平衡点，**PEBS**势能边界面

不稳定性判据的离散表达形式:

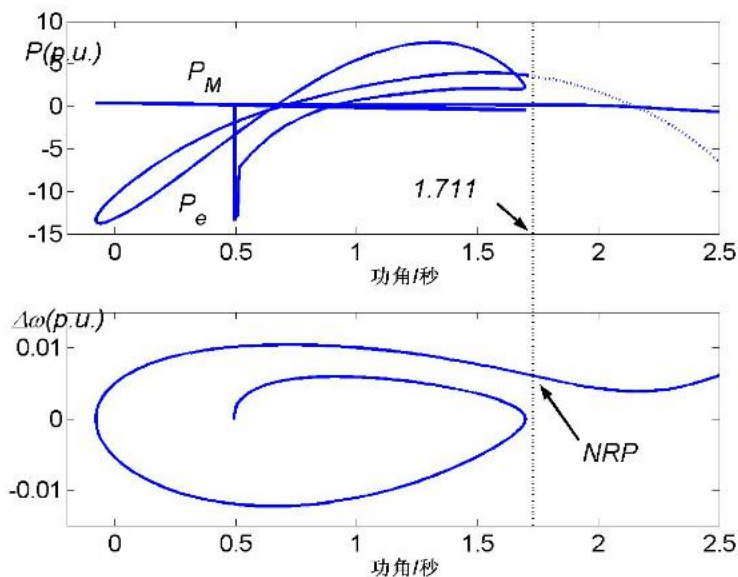
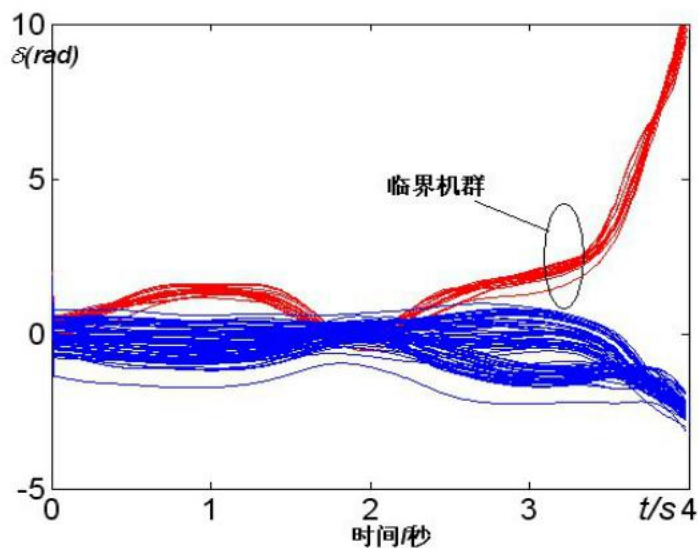
$$\tau = k(i) - k(i-1) > 0$$

$$\text{式中: } k(i) = \frac{\Delta\omega(i) - \Delta\omega(i-1)}{\delta(i) - \delta(i-1)}$$

由实测（或预测）的角度、角速度可以快速作出不稳定的判别，
投入紧急控制措施避免失稳！

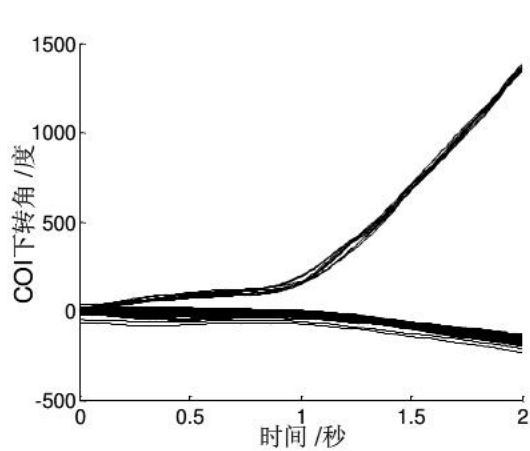


某114台发电机、总发电容量为2270万千瓦实际系统，某线路中点处发生永久性三相短路故障，主保护0.04s切除故障线路，区间多摆失稳模式， 在2.62s第二摆判出失稳。

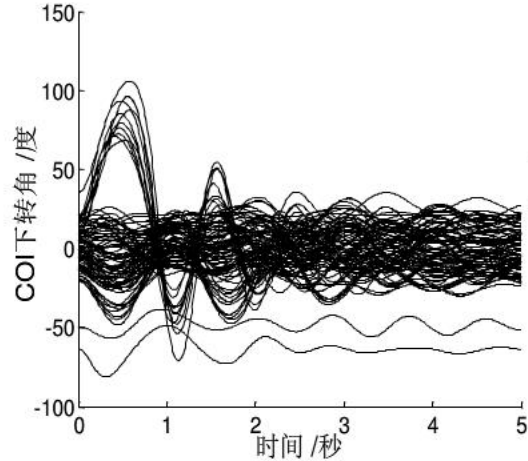


某114台发电机、总发电容量为2270万千瓦实际系统，预测后切机，阻止了系统不稳定！

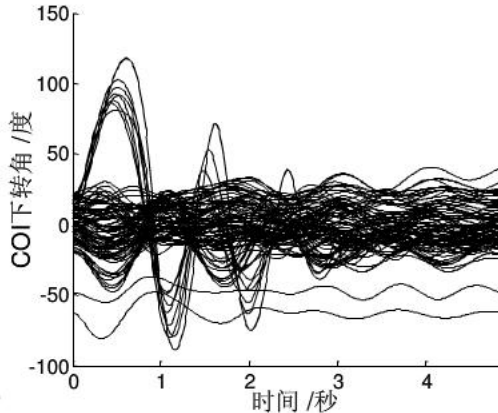
故障切除/s	失稳判别 /s	除切机	终切机
0.14	0.19	53	53
0.16	0.21	53、52	53、52、9
0.27	0.32	整体切机(13台)	



(I)故障0.14s切除, 未切机



(II)故障0.14s切除, 切53号机



(III)故障0.16s切除, 切发电机53、52、9

4、失步解列控制系统－解列继电器的发展

减少解列后系统的功率损失，提高系统的自愈性：

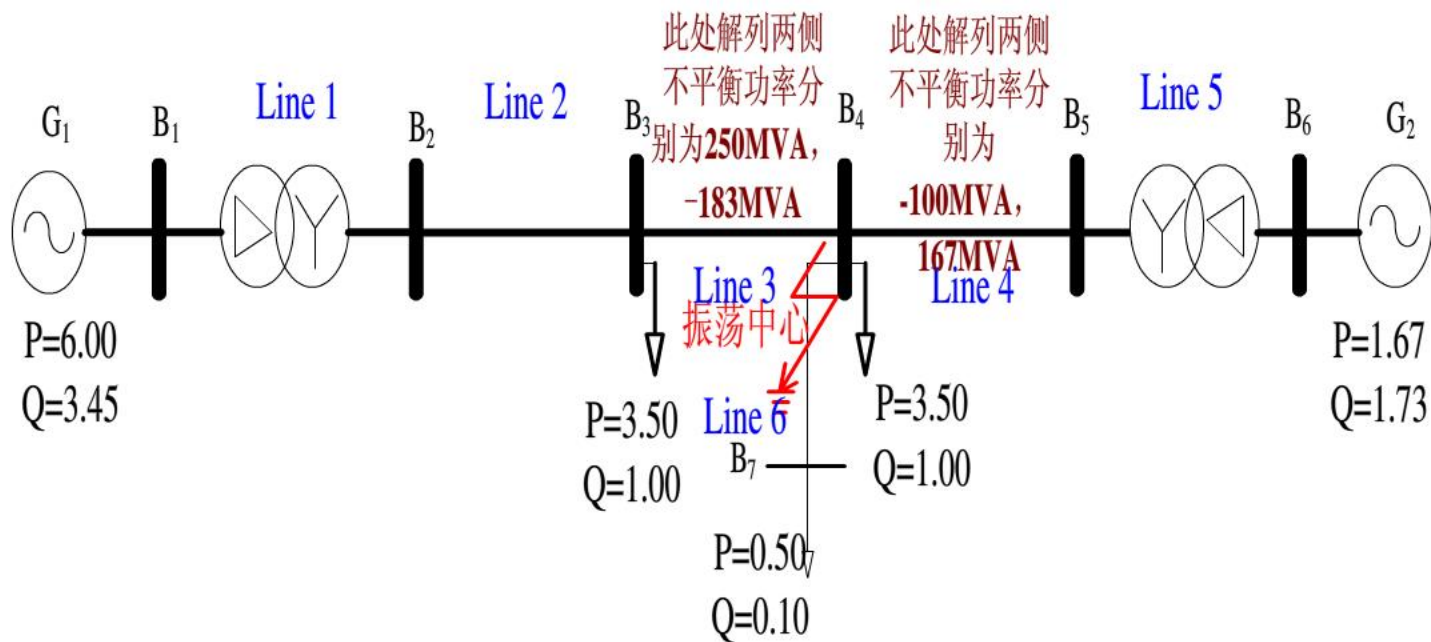
传统的失步解列依靠安装在输电线上的单个失步继电器动作跳开预定的线路，在多条联络线、失步模式变化较大的现代互联系统中难于满足：

解列后的子系统内不再失步；

解列后的子系统内不平衡功率最小。

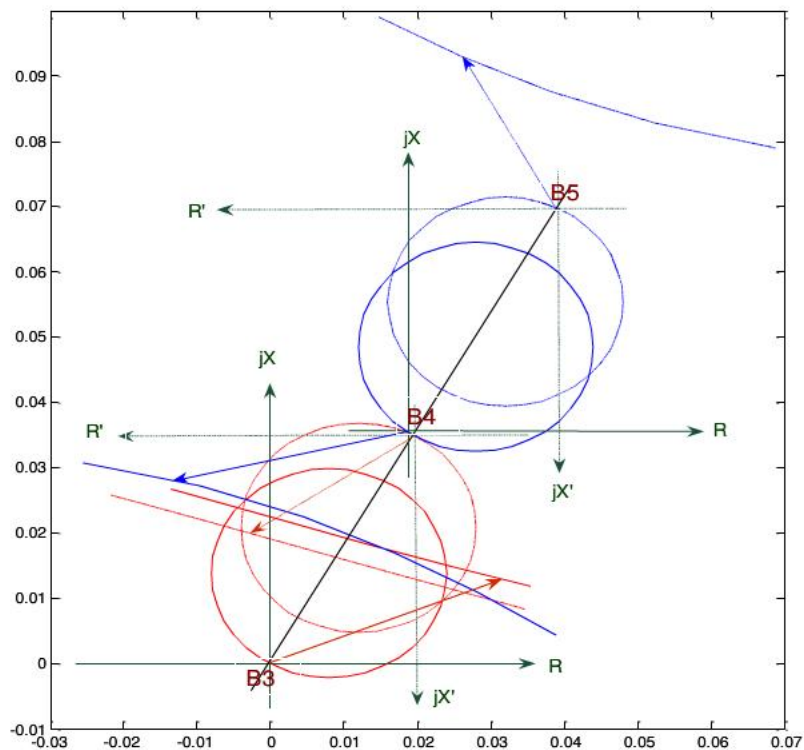
原因：失步机群不是经由一条线路交换功率，而是经由输电断面交换功率，应该在**该断面上功率最小割集处**解列。

两机系统失步解列示意图—在振荡中心处解列不一定合理!



振荡中心在线路3-4上, 按解列后两侧系统不平衡功率尽可能小的原则, 应在线路4-5处解列

阻抗型失步继电器测量轨迹



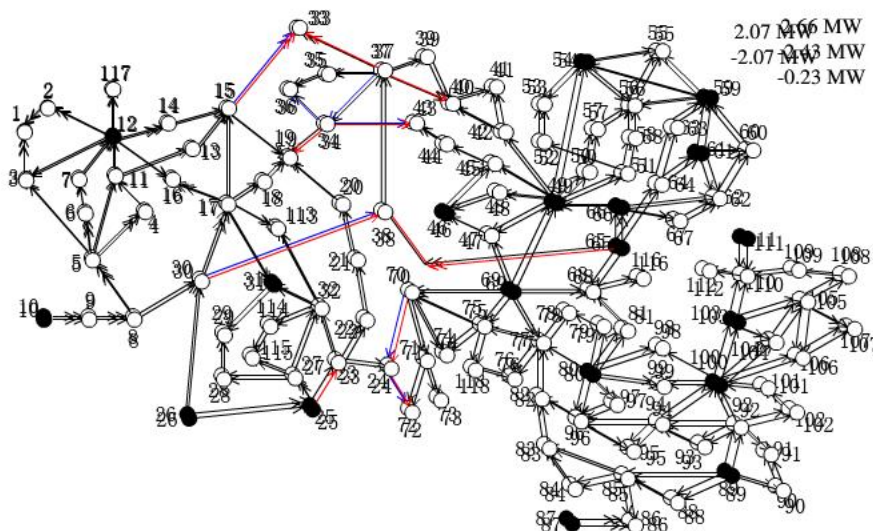
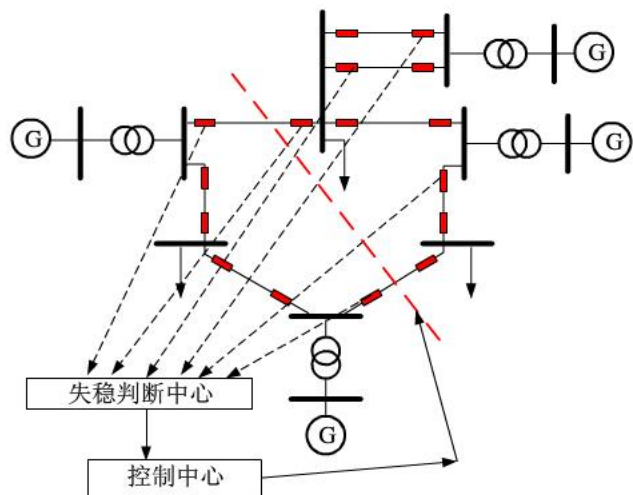
失步解列系统的关键技术

在线潮流的基础上，扰动后各失步解列继电器计算的失步参量（视在阻抗、 $UICOS\varphi$ 、支路能量等）高速送控制中心，控制中心进行失步模式判别、解列断面搜索并将需要跳开的断路器命令组下达给需要跳闸的失步解列继电器，继电器根据命令和自己的失步判别结果，执行跳闸。

关键技术：

- 1) 失步模式实时预测，决定发电机分群模式。
- 2) 解列断面的快速搜索（将失稳机群解开、群内不平衡功率最小）
- 3) 失步解列系统构建

失步解列系统算例



原解列**10**条线路且**33**号节点停电，扩大停电、恢复并网困难。新的解列方案跳**7**条线路、无节点停电，线路解列系统运算时间约**13ms**。

六、结 论

- 1.** 智能电网的发展要求保护承担更多维持系统在扰动后安全运行的责任。
- 2.** 智能电网的发展为保护的实现提供了更广泛、快速的信息条件。
- 3.** 保护的任务发展必将引起其原理、技术、配置方式等的发展，需要拓展学科内容和提高应用管理水平。
- 4.** 保护工作者依据多年的运行和研究经验，已经在用保护和实时控制手段逐步解决使电网更坚强、能自愈和避免大停电等问题。
- 5.** 加强保护的研究、制造和运行部门的积极合作，引领智能电网继电保护的国际发展是可能的。

谢谢大家！

祝四川电力公司 事业兴旺发达！