

# 关于紧急控制与校正控制优化和协调的评述

薛禹胜<sup>1,2</sup>, 王 达<sup>2,1</sup>, Q. H. WU<sup>3</sup>, 文福拴<sup>4</sup>

(1. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏省南京市 210003; 2. 山东大学电气工程学院, 山东省济南市 250061;  
3. 利物浦大学, 英国; 4. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

**摘要:** 闭环离散控制是电力系统在大扰动后保持运行可靠性的主要手段, 包括以故障驱动的紧急控制及由受扰轨迹驱动的校正控制。比较这 2 种方式的控制准则、动作时机、控制精度及代价, 以及切机、切负荷和解列措施。若用紧急控制来应对小概率高风险的不确定因素, 则在大多情况下将发生过控; 若用校正控制来应对概率大的不确定因素, 则机会成本很高。强调基于风险概念来协调这 2 种在物理和经济特性上都互补的控制方式, 并提出解耦优化-聚合协调的求解方法。

**关键词:** 紧急控制; 校正控制; 前馈控制; 反馈控制; 随机因素; 风险代价; 优化; 协调

**中图分类号:** TM712; TM76

## 0 引言

大停电的巨大经济损失和社会影响使其防御问题日益突出<sup>[1]</sup>。防御措施包括: 在系统故障发生前的规划和运行期间的预防控制、在特定故障发生后根据工况立即启动的紧急控制( EC)、在系统动态违反运行规程后触发的校正控制( CC)、在停电后的恢复控制<sup>[2-4]</sup>。

EC 和 CC 都是没有调度员参与的闭环控制。EC 以工况和故障做索引, 预先制作决策表; 一旦检测到故障立即按图索骥, 用前馈控制律执行决策表中相应的切机、切负荷( LS)、故障解列等措施。CC 则在检测到系统失步或母线较长地处于低频低压等违反安全规程的动态行为后, 按反馈控制律执行高频切机、低频减载( UFLS)、低压减载( UVLS) 和失步解列等措施。显然, EC 比 CC 动作早, 故控制效果大, 但精度差。

研究重点之一是如何以最小的 LS 量或控制代价来满足各项安全稳定约束<sup>[5-8]</sup>。一般忽略模型、参数、工况和故障等方面的随机因素<sup>[9-10]</sup>, 按典型工况的确定性仿真和保守原则制定控制策略。其决策不但不经济, 还可能带来危险的负效应<sup>[11]</sup>。在没有不确定性因素和预测误差的理想条件下, 只需要 EC 就可以实现充要的稳定控制。但在实际情况下若没有 CC, 就必须按最严重的不确定情况来设置 EC, 这样就会在其他情况下严重过控; 若不按最严重情况设置 EC, 则会在严重故障下欠控而扩大停电范围。

因此, EC 与 CC 的协调问题极为重要。但迄今为止, 预防控制、EC、CC 和恢复控制基本上被孤立地研究和应用, 文献[12-14] 研究了预防控制与 EC 的协调, 但鲜见关于 EC 与 CC 的协调算法。

本文首先讨论了闭环控制的决策要素, 包括: 系统模型与参数、工况、预想故障集、目标函数、约束条件、控制变量及控制时机。以切机、LS 和解列措施为例, 深入比较了 EC 与 CC 在启动判据、动作时机、控制代价、控制律及控制精度等方面的不同。讨论它们在确定工况及故障下的决策优化, 指出考虑不确定性因素和经济因素的必要性, 强调应按风险概念协调优化 EC 和 CC, 以兼顾安全性与经济性。

## 1 稳定控制决策问题的形式化

### 1.1 稳定控制的模型和参数

除代数微分方程外, 暂态稳定控制还需要用差分方程和逻辑语句描述设备和系统保护动作事件。所构成的逻辑-差分-微分-代数方程组中具有强时变和本质非线性特性, 故必须借助数值积分来求解。

一种模型对某些故障偏保守, 但很可能对另一些故障偏冒进, 因此所谓“采用保守的模型和参数”的说法很值得商榷。此外, 若不知道精确模型, 很难判定“保守”。因此, 应尽可能按模型和参数的期望方案进行仿真, 而在得到优化决策后, 再从保险的观点加以修正。可以用实测轨迹来校核仿真用的数学模型, 以减少对其他算例的仿真误差<sup>[15]</sup>。但其困难包括: ①缺乏足够多的实测轨迹; ②多组实测轨迹可能分属系统特性大变前后; ③高维参数识别存在可行性或多解问题; ④实测轨迹所对应的故障参数, 如接地阻抗难以得到。

收稿日期: 2009-02-24。

国家自然科学基金重大项目(50595413); 国家电网公司科技项目(SGKJ[2007] 98&187&2009)。

## 1.2 预想故障集

选择预想故障时要考虑具体系统的特点,除了高概率故障外还应包含概率不很大但后果严重者,如联络线、主力电厂和直流输电线故障<sup>[16]</sup>。但实际处理中往往遇到如何考虑  $N-2$  或更严重故障的困惑,多(或少)考虑一个更严重的场景就可能使结果变得非常保守(或冒进)。解决的途径是按风险值将尽量多的候选故障排序,然后按风险可接受水平截取该队列。由于风险反映了经济损失的期望值,因此改变该队列的截断位置并不会剧烈改变控制水平和安全风险。此外,不同的运行方式下可以有不同的故障集。

## 1.3 目标函数

确定性的优化目标一般为 LS 量最小<sup>[5]</sup>或用(经济因子或概率)加权的 LS 量最小<sup>[6-8]</sup>。文献<sup>[17]</sup>则用二次型兼顾控制后各节点电压值与参考值之差、控制代价及电压越限惩罚这 3 方面的目标。

使系统稳定的最小控制代价与故障发生概率的乘积即为风险代价<sup>[10]</sup>。通过在目标函数中增加主动控制风险代价项,可代替动态安全约束优化问题中隐函数不等式约束。在 EC 与 CC 的协调问题中,必须正确反映故障驱动及轨迹驱动的不同特性。

## 1.4 约束条件

LS 及解列后的系统仍应满足功角稳定,以及频率和电压的安全。文献<sup>[13]</sup>评述了处理功角稳定约束的各种方法,包括功角差的固定门限值、能量函数法、人工智能法、扩展等面积准则(EEAC)。文献<sup>[8]</sup>讨论了暂态电压和频率偏移的安全约束。

## 1.5 控制变量

作为 EC 及 CC 的主要措施,正确实施切机可以防止失步,限制高频;LS 对功角稳定、频率和电压的安全都有很大作用;解列是消除失步振荡的关键措施<sup>[18]</sup>。虽然它们都是离散控制,但其中的 LS 往往先按连续变量参加优化,再将其解离散化。其他措施还有快关、动态电阻制动、直流功率调制、串/并联电容强补、快速启动机组、再同步控制等<sup>[19-20]</sup>。

## 1.6 控制时机

EC 是故障驱动的前馈控制。从故障确认、决策表匹配到现场执行,其时间滞后很小,故控制的性价比。但由于其决策表是按典型场景预先准备的,实际场景与之失配就可能引起严重过控或欠控。“在线预决策”可以消除工况不匹配引入的误差,但无法消除模型等不确定因素引起的过控或欠控。CC 是轨迹驱动的反馈控制,不安全现象在其执行时刻已经呈现,故性价比要差。要达到 EC 同样的效果,就需要更多的 LS 量,甚至不可行。但反馈控制律可以消除过控及欠控问题。

## 2 故障驱动的切机和轨迹驱动的切机

故障驱动的切机一般是针对功角稳定性,其对象应该是主导映象中的领先群,以减少该映象的等值加速度,并且应该优先切除性价比大的而不是控制代价小的机组。切机策略的整定方法有:数值积分法<sup>[21]</sup>、人工智能方法<sup>[22]</sup>、直接法<sup>[23]</sup>、势能边界法(PEBS)/主导不稳定平衡点(BCU)法<sup>[24]</sup>、安全域法<sup>[7]</sup>及 EEAC 方法<sup>[11]</sup>等。值得注意的是,切机在减少领先群机械功率的同时也切除了其部分惯量。当后者起主要作用时,可能产生切机负效应。此外,若切机改变了失稳模式,使同一电厂中的其他机组改属新模式的余下群,则继续在该厂切机也会产生控制负效应<sup>[25]</sup>。

轨迹驱动的切机主要用于应对频率升高的不安全现象,其优化依据故障后系统的频率时间响应曲线和机组特性。如果仿真发现在某故障下,系统频率的正偏移处于临界安全,改变负荷模型很可能会得到不安全的结论。由于仿真误差的不确定性,不采用故障切机可能可以避免不必要的切机,但也可能由于延误必需的切机而增加控制代价。此时应该比较故障切机与轨迹切机的风险控制代价。

## 3 故障驱动的 LS 和轨迹驱动的 LS

### 3.1 故障驱动的 LS 及其优化

故障驱动的 LS 是紧急控制采用的方式,不同故障对应的控制决策均独立设置。改变一个故障驱动的 LS 决策不会影响对其他故障的决策。为了追求控制效果最大化,故采用前馈控制律,控制量一次到位。功角稳定性对控制的实时性要求非常高,不可能采用轨迹驱动的 LS。为了改善正摆稳定性,被减载的负荷必须在余下群机组所在区域。

传统上采用数值积分的定性分析及穷尽式搜索,或将待选的控制措施按代价从小到大分组,依次添加。这往往只能获得搜索路径上的第 1 个可行解。如果要在优化过程中考虑控制措施对稳定性提高的效果,就必须定义反映稳定程度的指标。文献中提出的这类指标包括:故障后某一特定时刻下发电机的功角差<sup>[5]</sup>、动态安全域边界面上法线方向的距离<sup>[7]</sup>、电气距离和供电可靠性的综合指标<sup>[26]</sup>。文献<sup>[27]</sup>将 LS 决策描述为最优控制问题,采用线性规划逼近非线性规划的方法确定最小的 LS 量。

如果能够找到可靠的、满足实用要求的稳定裕度指标,就可以精确量化各种措施的控制效果,识别控制负效应,避免陷入局部最优解。EEAC 理论提出了高维受扰轨迹摆次稳定性的概念以及评估每摆稳定裕度的量化方法。基于该量化指标,文献<sup>[6]</sup>

构造了 EC 优化的数学模型,并以控制措施的性能代价比代替控制措施的代价来引导搜索方向,在全局搜索策略中融入了局部优化,可以快速找到全局(准)最优解。该算法已广泛应用于实际电力工程的系统保护装置中。

充分利用以下多机系统的稳定控制机理有利于加速迭代过程:①所有 EC 措施对前向摆动和反向摆动的影响相反;②临界簇中的机组对稳定的影响与非临界簇中的相反;③某一个因素在减少临界簇加速功率的同时,也有可能减少其互补簇的加速功率;④当多种措施起作用时,其综合影响由稳定裕度函数决定。

### 3.2 轨迹驱动的 LS 及其优化

轨迹驱动的 LS 是校正控制采用的方式,只要母线感受到的频率(或电压)轨迹满足预定的动作条件,就执行相应的 UFLS(或 UVLS)控制,而不管由何种原因引起。为保证控制精度,故采用反馈控制律,根据目标变量下降的动态,分轮切除适当数量的较次要负荷,直到系统安全为止<sup>[28]</sup>。

轨迹驱动控制的任务是为了弥补预防控制和 EC 的不足,并应对各种难以预料的复杂故障。其优化内容包括:装置布点、分轮定值及其配合,也可以在特定场景下选择或闭锁控制地点或改变整定值,优化引入的全局量<sup>[2-4]</sup>。迄今为止,在此方向上的研究很少。

目前,轨迹驱动的 LS 的研究主要集中在 LS 量或 LS 代价的优化上,各轮次的门槛值和延时则由运行经验确定。文献[29]根据故障后发电机的频率及其变化率来估计系统的功率缺额,确定 UFLS 量。文献[8]在给定各轮次 LS 最大量的前提下,将每一种控制措施在所有运行方式及预想故障下对频率或电压安全裕度的改善与其经济代价之比的概率加权之和作为该措施的性能比,逐轮优化 LS 量。

轨迹驱动的 LS,其任何决策都与所有故障相关,而不能仅考虑某个特定故障。因此,难以像故障驱动的 LS 那样,同时对装置布点和分轮设置优化。建议先优化装置布点,再优化分轮设置,必要时也可迭代改进。

#### 1) 装置布点的优化

对于频率与电压偏移的可接受性,允许采用实时性较低的轨迹驱动的 LS。但需要克服的缺陷包括:UFLS 和 UVLS 的孤立处理、按等值单机单负荷模型整定及按比例分配的方式、基于经验的分轮设置、确定性设计等。文献[30]按停电期间给用户造成经济损失最小的目标选择 LS 地点。文献[8]定义了暂态频率和电压安全裕度指标,并优先切除对所有故障场景的总体控制性价比最大的负荷。

文献[31]忽略分轮控制的影响,按首轮单位数量 LS 的全局贡献度来评估不同控制母线的效果,其中计及各种场景及故障的组合。全局贡献度应综合考虑控制母线的可切负荷量、控制性价比和控制代价,以及由于违约被消除所带来的机会收益。

#### 2) 分轮设置的优化

UFLS 和 UVLS 按照逐轮降低的动作值分轮,当受扰轨迹连续低于某轮动作值的时间超过定值后,执行该轮 LS。各轮门槛值与延时的设置要保证其选择性<sup>[32]</sup>。文献[33]在传统的基本轮加特殊轮的方式中,引入紧急轮,充分利用系统旋转备用,以减少每轮过切的负荷量。过切会导致系统频率回升过多和局部过电压等问题,文献[34]提出必要时通过快速恢复部分负荷和直流功率调制等方法解决。

目前,UFLS 的整定方法有传统法、半自适应方法和自适应方法 3 种<sup>[35]</sup>,但均难以满足现代电力系统的要求<sup>[36]</sup>。其中应计及负荷的电压与频率特性<sup>[37-38]</sup>,负荷特性会影响实际的 LS 量,甚至造成控制负效应<sup>[39]</sup>。全局贡献度的概念也被用来优化分轮的设置,但此时不应再针对控制母线的整体,而应该细化到控制的各轮次。

## 4 故障解列和失步解列

### 4.1 2 种解列方式

解列是指在适当的断面和时间将系统分为非同步运行的若干部分,是消除系统振荡和避免停电范围扩大的重要措施<sup>[40]</sup>。中国电力行业标准规定:运行中的电力系统必须在适当地点设置解列点,并装设自动解列装置<sup>[41]</sup>。故障解列由预先指定的故障驱动,属于预测型措施;失步解列则在检测到失步现象后(2 个~3 个滑步周期内)才动作,属于反馈型措施。若系统在某故障下肯定要失步或发生严重低频振荡,则应该采用故障解列,以尽早消除振荡冲击。但在产生恶果的可能性不大时,则依靠失步解列来替代故障解列往往可减少不必要的解列风险。

介于两者之间,文献[42]根据故障后联络线两侧母线电压的相角差的轨迹外推来预测失步可能性并决策。由于电力系统强烈的时变性,这类方法难以满足工程可靠性要求。

一个好的解列方案不仅要能够保证解列后各孤立子系统的同步稳定性,而且要尽可能减少其有功和无功率的不平衡,使解列后各孤立系统满足安全稳定约束所支付的控制代价最小。

### 4.2 故障解列及其优化

故障解列的启动判据是特定工况和故障的组合,由事先的仿真确定,并储存在决策表中备查。当实时匹配成功后立即执行解列,此时振荡角往往

尚未摆得很大。由于振荡能量积累得不多,故后续处理容易。但由于仿真依据的典型工况、模型参数和故障场景与实际情况未必相同,故障解列可能会导致不必要的解列控制和经济损失。

#### 4.3 轨迹解列及其优化

失步解列需要准确判断系统是否已经处于失步状态,故其后续控制的代价必然较大。最直观的判据是失步中心两侧(或两部分)的相角差。除了利用相量测量单元(PMU)技术监视相角差的变化以外<sup>[43]</sup>,失步解列还可以采用间接反映功角轨迹的判据,例如电流变化或基于补偿原理的判据,以及基于视在阻抗、 $u \cos \varphi$ 、视在阻抗角等轨迹的判据<sup>[44-47]</sup>。

通常认为在振荡中心解列有利于解列后各孤立系统的同步稳定性。除了按电压最低点来寻找振荡中心外,还可根据在一个振荡周期内联络线两端无功功率的积分值或线路两侧的无功流向判断<sup>[48]</sup>。

应尽量使解列点接近交换功率最小处,以减少解列后各孤立系统内的功率不平衡,从而减小后续控制措施的风险。此外还要适当考虑操作的方便性,减小支路开断数。系统中的解列点常设于:①电力系统间的联络线;②地区终端系统与主系统联络的适当地点;③规定事故时专带厂用电的机组;④未解环的高低电压环网<sup>[49]</sup>。在多模式振荡时,可先按同调分群或功率平衡,解列为单模式振荡,再进一步解列或再同步<sup>[18]</sup>。

多个解列点之间应互相配合,以保证系统可靠解列,并避免不必要的线路开断<sup>[50]</sup>。文献[51]利用PMU采集的实时信息来捕捉振荡中心,跟踪振荡中心转移,正确解开振荡中心所在断面。

## 5 EC与CC的协调

### 5.1 协调的重要性与机理

EC和CC都可以采用LS(或切机,或解列)作为控制措施,但由于执行时机和控制规律上的不同,效果自然也就不同。传统的做法是按故障类型和故障数目将扰动分为较低、中等、严重3类,分别由预防控制、EC和CC应对,而对它们的研究也一直被割裂。但是,同样类型的故障在不同的系统中,或同一系统的不同母线上,甚至同一母线在不同运行方式下的后果都可能截然不同。

EC属于预测型控制,在故障的不安全后果尚未充分表现的10ms内,针对具体故障完成对控制地点、措施种类及控制量的决策。其控制时机早,效果好,但控制精度难以保证。按照对控制措施评估和选择的时机可将其分为3类。其中,“实时计算、实时控制”方式并不可行;“离线预算、实时匹配”方式的控制精度太差;“在线预算、实时匹配”方式是较

好的发展方向。

当前普遍采用的“离线预算、实时匹配”方式的决策表是在离线环境下按典型工况计算的。凡列入工况特征的那些参数,虽然可通过若干不同的离散值来改变仿真场景,而设置不同的预决策,但为了保证被归入该档参数值的实际工况都能稳定,必然非常保守。这不但经济,还可能引入危险的负效应。

更为危险的是受到维数灾的约束,绝大多数参数无法作为工况特征而被分档,只能以统一的数值参与仿真,而不能反映其影响。然而这些未列入工况特征的参数完全可能在特定条件下显著改变系统稳定性。因此,“离线预算、实时匹配”方式并非总是保守,而很可能偶露狰狞。

CC属于反馈型控制,依据系统出现的不安全现象投入对应的控制措施,故控制时机晚,控制代价大,但控制精度高。CC有助于避免系统在预先未考虑的严重故障下崩溃,此外还可以按较小的保守性来设置EC,以减小大多数故障下的控制代价,而通过反馈控制来解决小概率的EC欠控或拒动问题。EC可以减小CC的强度,而CC则可以减轻EC的保守性,两者之间存在很强的互补性。

EC和CC的措施大多为离散变量,但其中LS的控制量需要先按连续化变量参加优化。它们的协调是数学上的混合规划问题,其约束条件涉及高维的时变非线性微分-代数方程组,包括功角的同步和振荡稳定性,以及频率和电压的安全性。其中,还需要考虑不确定的工况和场景。

因此,EC与CC的协调应该建立在风险概念的基础上。如果系统在某故障下既不能肯定一定需要切机,也不能肯定一定不需要切机时,应该比较采用轨迹驱动的切机来代替故障驱动的切机时的正、反两面效应。这包括由于避免不必要的切机而减少控制代价期望的正面效应,以及由于延误必需的切机而增加控制代价期望的反面效应。

### 5.2 面临的困难及研究现状

EC与CC的协调优化属于时变系统动态规划问题。首先,作为安全约束条件的稳定裕度函数具有非常复杂的非凸性,必须寻找能够揭示稳定机理且满足实用要求的稳定裕度指标,才能有效地比较各种控制措施的效果。其次,高维的决策空间中各措施之间具有非常强烈的非线性交互影响,而实际电网中涉及的控制变量又非常多,这使协调问题极其复杂。

文献[27]提出了紧急控制和校正控制中的LS协调问题;文献[1]指出俄罗斯的大停电防御体系需要引入不同防线间的纵向协调和地理区域间的横向协调;文献[52]基于稳定性的概率分析,指出交

直流系统暂态稳定控制的多种措施之间协调的必要性。但现有文献中未见具体的协调策略及算法。

### 5.3 解耦优化-迭代协调

分解-聚合是解决大系统优化问题的有效方法。为此,先分别优化 EC 和 CC 子问题,期间将另一个子问题作为场景,然后在迭代中及时修正外部场景,直到总风险代价不再明显减少为止。

电力系统解列成 2 个或多个异步运行的部分后,往往还需要在发电功率过多(或短缺)的区域施加切机(或 LS)措施。为此,将计及各种随机性的控制代价之和作为目标函数,优化解列方案。如果某个故障在归类于某典型方式的大多数情况下都会导致失步,一般采用故障解列更经济;如果只在极少数情况下失步,则采用失步解列较好。优化的任务就是针对每种典型故障,在 2 种解列方式中选择风险较小者。

可以采用“在线预算、实时匹配”的方法提高故障解列的自适应性。由控制中心站、就地解列主站、解列装置组成自适应失步解列系统,就地解列主站按照断面功率或者风险代价寻找最优的解列割集,并跟随工况变化刷新解列策略。在振荡中心发生转移时,控制中心负责检测振荡中心位置,并向位于振荡中心断面的就地解列主站发出执行命令。

协调 2 类 LS 措施,以总的风险代价最小来保证系统在不同工况、故障及其他不确定性因素下的稳定性。在各种不确定因素最不利的组合下,系统安全性不再完全依靠故障驱动的 LS 来保证,而是与轨迹驱动的 LS 协同完成。这可以大大减小故障驱动的 LS 在其他场景下的过控制风险。但如果故障驱动的 LS 量( $P_{LS}^{FD}$ )太小,使太多的故障都要靠轨迹驱动的 LS 量( $P_{LS}^{TD}$ ,是  $P_{LS}^{FD}$  的函数)来维持稳定,则由于后者的性价比要差得多,故总的风险代价  $R_{LS}$  又会增加。当  $\partial R_{LS} / \partial P_{LS}^{FD} = \partial R_{LS} / \partial P_{LS}^{TD}$  时,总控制风险代价最小。

## 6 结语

目前,EC 和 CC 都按确定工况、模型、参数及故障场景分别设置。若用 EC 来保证系统在不确定因素最不利的组合下的稳定性,则在绝大多数情况下将严重过控。但如果过分依赖 CC,又会不必要地耽误控制时机而增大 LS 量,甚至失控。EC 与 CC 在物理特性及经济特性上的互补性为它们的协调提供了空间,而风险管理概念的引入则解决了如何考虑 N-2 及更严重故障的问题。

紧密关联且经济特性不同的各道防线之间的协调对提高电力系统运行可靠性和经济性的意义重大。预防控制与 EC 的协调已在有关文献中讨论

过,本文及后续文章开始涉及 EC 与 CC 的协调。它们离真正的工程实用还都有一定距离,但坚信这个时间-空间-物理综合优化问题是稳定分析控制领域中的长期发展方向之一。

## 参考文献

- [1] MAKAROV Y V, RESHETOV V I, STROEV V A, et al. Blackout prevention in the United States, Europe, and Russia. *Proceedings of the IEEE*, 2005, 93(11): 1942-1955.
- [2] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架:(一)从孤立防线到综合防御. *电力系统自动化*, 2006, 30(1): 8-16.  
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part I from isolated defense lines to coordinated defending. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(1): 8-16.
- [3] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架:(二)广域信息、在线量化分析和自适应优化控制. *电力系统自动化*, 2006, 30(2): 1-10.  
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part II reliable information, quantitative analyses and adaptive controls. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(2): 1-10.
- [4] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架:(三)各道防线内部的优化和不同防线之间的协调. *电力系统自动化*, 2006, 30(3): 1-10, 106.  
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part III optimization and coordination of defense-lines. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(3): 1-10, 106.
- [5] 毕兆东, 王建全, 韩祯祥. 基于数值积分法灵敏度的快速切负荷算法. *电网技术*, 2002, 26(8): 4-7, 43.  
BI Zhaodong, WANG Jianquan, HAN Zhenxiang. A fast load shedding algorithm based on integral sensitivity. *Power System Technology*, 2002, 26(8): 4-7, 43.
- [6] 陈永红, 薛禹胜. 区域紧急控制的优化算法. *中国电力*, 2000, 33(1): 44-48.  
CHEN Yonghong, XUE Yusheng. Optimal algorithm for regional emergency control. *Electric Power*, 2000, 33(1): 44-48.
- [7] 余贻鑫, 刘辉, 曾沅. 基于实用动态安全域的紧急控制策略. *电力系统自动化*, 2004, 28(6): 6-10.  
YU Yixin, LIU Hui, ZENG Yuan. A novel emergency control strategy based on practical dynamic security regions. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(6): 6-10.
- [8] 徐泰山, 李碧君, 鲍颜红, 等. 考虑暂态安全性的低频低压减载量的全局优化. *电力系统自动化*, 2003, 27(22): 12-15.  
XU Taishan, LI Bijun, BAO Yanhong, et al. Optimal parameter-setting of under-frequency and under-voltage load shedding for transient security. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(22): 12-15.
- [9] 赵霞, 周家启, 胡小正, 等. 暂态稳定性分析中的确定性方法和概率性方法. *电力系统自动化*, 2006, 30(6): 100-103.  
ZHAO Xia, ZHOU Jiaqi, HU Xiaozheng, et al. Deterministic and probabilistic approaches in transient stability studies. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(6): 100-103.
- [10] 薛禹胜, 刘强, DONG Zhaoyang, 等. 关于暂态稳定不确定性分析的评述. *电力系统自动化*, 2007, 31(14): 1-6, 75.

- XUE Yusheng, LIU Qiang, DONG Zhaoyang, et al. A review of non-deterministic analysis for power system transient stability. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(14): 1-6, 75.
- [11] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论——非自治非线性多刚体系统的稳定性分析. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999.
- [12] 薛禹胜. 暂态稳定预防控制和紧急控制的协调. *电力系统自动化*, 2002, 26(4): 1-4, 9.  
XUE Yusheng. Coordinations of preventive control and emergency control for transient stability. *Automation of Electric Power Systems*, 2002, 26(4): 1-4, 9.
- [13] 薛禹胜, 李威. 关于暂态稳定控制决策优化方法的思考. *电力系统自动化*, 2003, 27(10): 15-21.  
XUE Yusheng, LI Wei. A review on the optimization of transient stability controls. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(10): 15-21.
- [14] XUE Y, LI W, HILL D J. Optimization of transient stability control: Part II for cases with different unstable modes. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2005, 3(2): 341-345.
- [15] DEUSE J, DUBOIS J, FANNA R, et al. EWR under-voltage load shedding scheme. *IEEE Trans on Power Systems*, 1997, 12(4): 1446-1454.
- [16] 白雪峰, 倪以信. 电力系统动态安全分析综述. *电网技术*, 2004, 28(16): 14-20.  
BAI Xuefeng, NI Yixin. Survey on dynamic security assessment of power systems. *Power System Technology*, 2004, 28(16): 14-20.
- [17] LARSSON M, KARLSSON D. Coordinated system protection scheme against voltage collapse using heuristic search and predictive control. *IEEE Trans on Power Systems*, 2003, 18(3): 1001-1006.
- [18] 袁季修. 电力系统安全稳定控制. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [19] IEEE Power System Engineering Committee. A description of discrete supplementary controls for stability. *IEEE Trans on Power Apparatus and Systems*, 1978, 97(1): 149-157.
- [20] KUNDUR P. 电力系统稳定与控制. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [21] KARADY G G, GU J. A hybrid method for generator tripping. *IEEE Trans on Power Systems*, 2002, 17(4): 1102-1107.
- [22] 刘玉田, 杜正春, 夏道止. 应用神经网络决定电力系统暂态稳定切机控制规律. *电力系统自动化*, 1994, 18(5): 9-13.  
LIU Yutian, DU Zhengchun, XIA Daozhi. Determination of generator-shedding for power system transient stability control by neural networks. *Automation of Electric Power Systems*, 1994, 18(5): 9-13.
- [23] SUN Y Z, LI X, SONG Y H. A new Lyapunov function for transient stability analysis of controlled power systems// *Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting: Vol 2, January 23-27, 2000, Singapore: 1325-1330.*
- [24] TONG J Z, CHIANG H D, CONNEEN T P. A sensitivity-based BCU method for fast derivation of stability limits in electric power systems. *IEEE Trans on Power Systems*, 1993, 8(4): 1418-1428.
- [25] 鲍颜红, 徐泰山, 孟昭军, 等. 暂态稳定控制切机负效应问题的 2 个实例. *电力系统自动化*, 2006, 30(6): 12-15.  
BAO Yanhong, XU Taishan, MENG Zhaojun, et al. Two field cases for the negative effect problems caused by generator tripping in the transient stability control. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(6): 12-15.
- [26] 余志文, 白雪峰, 郭志忠, 等. 大容量远距离输电电网暂态稳定控制方法的探讨. *电力系统自动化*, 2003, 27(4): 57-60, 65.  
YU Zhiwen, BAI Xuefeng, GUO Zhizhong, et al. Probe on the transient stability control method for heavily stressed transmission network. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(4): 57-60, 65.
- [27] 王建全, 王伟胜, 朱振青, 等. 电力系统最优切负荷算法. *电力系统自动化*, 1997, 21(3): 33-35, 38.  
WANG Jianquan, WANG Weisheng, ZHU Zhenqing, et al. Optimal load-shedding algorithm in power system. *Automation of Electric Power Systems*, 1997, 21(3): 33-35, 38.
- [28] DL 428—91 电力系统自动低频减负荷技术规定. 北京: 中国电力出版社, 1991.
- [29] TERZIJA V V. Adaptive under-frequency load shedding based on the magnitude of the disturbance estimation. *IEEE Trans on Power Systems*, 2006, 21(3): 1260-1266.
- [30] WANG P, BILLINTON R. Optimum load shedding technique to reduce the total customer interruption cost in a distribution system. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, 2000, 147(1): 51-56.
- [31] 任先成, 薛禹胜, WU Q H, 等. 低频低压切负荷布点及轮次的优化与协调. *电力系统自动化*, 2009, 33(10): 1-5, 53.  
REN Xiancheng, XUE Yusheng, WU Q H, et al. Optimization and coordination of UF/UVLS placement and multi-step load shedding. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(10): 1-5, 53.
- [32] GREWAL G S, KONOWALEC J W, HAKIM M. Optimization of a load shedding scheme. *IEEE Industry Applications Magazine*, 1998, 4(4): 25-30.
- [33] 秦明亮, 杨秀朝. 减少低频减载方案过切的措施研究. *电网技术*, 2002, 26(3): 83-86.  
QIN Mingliang, YANG Xiuchao. Measures to reduce over-shedding caused by under-frequency load shedding project. *Power System Technology*, 2002, 26(3): 83-86.
- [34] TAYLOR C W, NASSIEF F R, CRESAP R L. Northwest power pool transient stability and load shedding controls for generation load imbalances. *IEEE Trans on Power Apparatus and Systems*, 1981, 100(7): 3486-3495.
- [35] DELFINO B, MASSUCCO S, MORINI A, et al. Implementation and comparison of different under-frequency load-shedding schemes// *Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting: Vol 1, July 15-19, 2001, Vancouver, Canada: 307-312.*
- [36] 薛禹胜, 任先成, WU Q H, 等. 关于低频低压切负荷决策优化协调的评述. *电力系统自动化*, 2009, 33(9): 100-107.  
XUE Yusheng, REN Xiancheng, WU Q H, et al. A review on the optimization and coordination of UFLS and UVLS controls. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(9): 100-107.
- [37] TAYLOR C W. Concepts of under-voltage load shedding for voltage stability. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1992, 7(2): 480-488.

- [38] PALANISWAMY K A, SHARMA J, MISRA K B. Optimum load shedding taking into account of voltage and frequency characteristics of loads. *IEEE Trans on Power Apparatus and Systems*, 1985, 104(6): 1342-1348.
- [39] 任先成,薛禹胜,WU Q H,等.低频低压切负荷的控制负效应及其机理. *电力系统自动化*,2009,33(11):1-7.  
REN Xiancheng, XUE Yusheng, WU Q H, et al. Negative effects and their mechanisms analysis of UFLS and UVLS controls. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(11): 1-7.
- [40] 韩祯祥. *电力系统稳定*. 北京:中国电力出版社,1995.
- [41] DL 755—2001 电力系统安全稳定导则. 北京:中国电力出版社, 2001.
- [42] OHURA Y, SUZUKI M, YANAGIHASHI K, et al. A predictive out-of-step protection system based on observation of the phase difference between substations. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1990, 5(4): 1695-1704.
- [43] FAUCON O, DOUSSET L. Coordinated defense plan protects against transient instabilities. *IEEE Computer Applications in Power*, 1997, 10(3): 22-26.
- [44] 高鹏,王建全,甘德强,等. 电力系统失步解列综述. *电力系统自动化*,2005,29(19):90-96.  
GAO Peng, WANG Jianquan, GAN Deqiang, et al. Review on power system out-of-step separation. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(19): 90-96.
- [45] 潘贞存,桑在中,戴方涛,等. 电网自动解列的新判据. *电力系统自动化*,1995,19(7):34-37.  
PAN Zhencun, SANG Zaizhong, DAI Fangtao, et al. A new criterion for power system automatic separation. *Automation of Electric Power Systems*, 1995, 19(7): 34-37.
- [46] 宗洪良,任祖怡,郑玉平,等. 基于  $ucos\varphi$  的失步解列装置. *电力系统自动化*,2003,27(19):83-85.  
ZONG Hongliang, REN Zuyi, ZHENG Yuping, et al. An out-of-step splitting device based on the changing track of the voltage of oscillation center. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(19): 83-85.
- [47] VITTAL V, OH T, FOUAD A A. Apparent impedance correlation of transient energy margin and time simulation. *IEEE Trans on Power Systems*, 1988, 3(2): 455-461.
- [48] 高鹏,王建全,周文平,等. 基于无功功率捕捉失步解列断面的理论研究. *电力系统自动化*,2005,29(5):15-20.  
GAO Peng, WANG Jianquan, ZHOU Wenping, et al. Theoretical study on capturing the separation interface of out-of-step based on reactive power. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(5): 15-20.
- [49] 王梅义,吴竞昌,蒙定中. *大电网技术*. 北京:中国电力出版社, 1995.
- [50] 宗洪良,孙光辉,刘志,等. 大型电力系统失步解列装置的协调方案. *电力系统自动化*,2003,27(22):72-75.  
ZONG Hongliang, SUN Guanghui, LIU Zhi, et al. Coordination of out-of-step protection equipment in large power systems. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(22): 72-75.
- [51] 方勇杰. 电力系统的自适应解列控制. *电力系统自动化*,2007, 31(20):41-44,48.  
FANG Yongjie. Adaptive islanding control of power systems. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(20): 41-44, 48.
- [52] 丁明,黄凯,李生虎. 概率暂态稳定研究中紧急控制措施的模拟及效果分析. *电工技术学报*,2002,17(5):72-77,90.  
DING Ming, HUANG Kai, LI Shenghu. Simulation and effect analysis to the emergency control measures in probabilistic transient stability study. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2002, 17(5): 72-77, 90.

---

薛禹胜(1941—),男,中国工程院院士,博士生导师,主要研究方向:电力系统自动化。E-mail: yxue@sgepri.com  
王 达(1981—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电力系统稳定。E-mail: wang\_da81@163.com  
Q. H. WU(1953—),男,教授,主要研究方向:电力系统自动化。E-mail: qhwu@liv. ac. uk

## A Review on Optimization and Coordination of Emergency Control and Correction Control

XUE Yusheng<sup>1,2</sup>, WANG Da<sup>2,1</sup>, Q. H. WU<sup>3</sup>, WEN Fushuan<sup>4</sup>

- (1. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China; 2. Shandong University, Jinan 250061, China;  
3. The University of Liverpool, Liverpool L69 3GJ, UK;  
4. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Closed-loop discrete control is the main means for maintaining operational reliability of power systems subject to large disturbance, which includes fault-driven emergency control and trajectory-driven corrective control. This paper compares the criterion, execution time, precision and cost of the two control strategies, as well as their generator tripping, load shedding and network splitting actions. If an emergency control is used to cope with uncertain factors occurring in small probability and high risk, it will most likely lead to over-controlled results in most of operational scenarios. If correction control is used in this case to cope with the factors that have a large probability to occur, the opportunity cost would be high. Based on the risk analysis to emphasize a compromise between these two control strategies with consideration of their physical and economic characteristics, this paper proposes a method using decoupling-optimization and global-coordination to find a minimum risk solution.

This work is jointly supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50595413) and State Grid Corporation of China (No. SGKJ[2007] 98&187&2009).

**Key words:** emergency control; correction control; feed-forward control; feed-back control; uncertain factors; risk cost; optimization; coordination