

# 计及电压稳定的自适应协调低频减载策略

李 顺, 廖清芬, 刘涤尘, 唐 飞

(武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 为了提高资源利用率, 电网经常处在临界稳定的运行状态, 大停电事故往往在系统重负荷运行时发生, 多表现为多个电气量协同作用下的系统崩溃。提出一种计及电压稳定的自适应协调低频减载策略。根据功率缺额的动态计算值对扰动的严重程度进行分类, 以期有针对性地采取不同的控制措施。若发生严重故障则需要进行两阶段的减载, 先基于各负荷母线的频率调节效应来指导阶段 1 的选址定容, 然后应用有功网损灵敏度来获取电压薄弱区域信息, 计及时延后实施阶段 2 的减载; 若发生一般故障则直接进行阶段 2 的减载过程。仿真对比验证了所提策略的有效性和优越性, 该策略可以自适应不同严重程度的故障扰动, 并能及时有效地保证系统频率稳定以及各母线处的电压稳定。

**关键词:** 协调减载策略; 频率稳定; 电压稳定; 自适应控制

**中图分类号:** TM 761

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.12.022

## 0 引言

随着我国社会的建设发展, 输电走廊的获取难度不断加大, 为了提高电网的利用率, 电网更多时候都处在临界稳定的运行状态, 这加大了电网的安全稳定风险<sup>[1]</sup>。三道防线的综合防御体系在电网中的应用, 至今已成功地防御了我国的大范围停电, 有效保持了电网的安全稳定<sup>[2]</sup>。

在系统受到大扰动后, 安稳控制最后一道防线中的低频减载和低压减载能保障系统的频率稳定和电压稳定, 防止系统发生崩溃<sup>[3]</sup>。综观国内外相关文献, 所提出的减载方案大多是集中于单一电气量的控制策略。文献[4]提出了基于负荷母线减载控制灵敏度的减载地点选取方法及减载量分配模型。文献[5]设计了一套计及动态修正的自适应广域低频减载方法。文献[6]推导了考虑负荷特性的电压稳定裕度指标, 并将该指标引入低压减载模型, 应用优化算法寻求最优减载地点和减载量。文献[7]提出了基于广域测量的自适应低压减载策略, 该策略的选址定容是基于无功缺额和所构建的电压稳定评价指标。文献[8]应用点估计法, 并基于蒙特卡洛仿真分析制定了概率型低压减载方案。

近年来, 大量的研究结果表明, 大停电事故往往在系统重负荷运行时发生, 其更多地表现为多个电气量协同作用下的系统崩溃<sup>[9]</sup>。因此, 设计一种能够

协同保持系统频率和电压稳定的安稳措施显得尤为重要。目前, 较多文献是针对低频/低压减载的协调优化进行研究。文献[10]提出解耦优化、迭代协调的思想, 即将低频和低压减载的协调优化转换为各自装置布点、首轮和后续控制量的优化及协调。文献[11]推导了计及母线负荷无功变化和电压偏移程度的减载量分配指标, 提出了考虑系统频率、负荷电压及无功响应的自适应减载方案。文献[12]通过在减载过程中同时考虑无功缺额和有功缺额, 制定了相应的联合减载策略。文献[13]设计一套分散式减载方案, 基于负荷母线的电压降落来动态改变低频减载的动作阈值。文献[14]应用一种综合电压与频率动态交互影响的减载方法, 来指导减载动作地点和时间的确定, 但该方法因频率电压相关系数的实时辨识尚未有效解决, 其工程适用性还需进一步研究。

对上述提及的文献进行分析, 可知当前低频/低压减载策略大多是基于传统减载方案的协调优化。然而, 因为节点电压的变化具有强非线性的特征, 因此基于电压阈值的低压减载策略并不能有效地保证系统稳定。因此, 本文考虑协调减载控制的实施, 通过在减载过程中自适应地及时获取电压薄弱区域的信息来有效解决这一问题。

文献[15-17]构建了用于定量分析系统接近电压失稳程度的指标。本文基于电压趋于失稳时系统有功网损将突然增大这一特征, 采用网损灵敏度  $dP_L/dP$  来确定故障后任意母线处电压失稳的脆弱程度。相比其他指标, 该指标的计算复杂度较低, 而根据其所改造的二阶指标, 由于具有线性好和计算速度快的特点, 能够应用于电压稳定在线监测以及减载动作后的稳定性评估。

本文在对频率和电压进行稳定性分析的基础

收稿日期: 2017-04-06; 修回日期: 2017-11-02

基金项目: 国家电网公司科技项目(多区域安控系统协调及在线诊断、辅助决策技术研发应用); 国家自然科学基金资助项目(51507116)

Project supported by the Science and Technology Program of SGCC(Research on Coordination, Online Diagnostics and Auxiliary Decision-making Technology of Multi-zone Stability Control System) and the National Natural Science Foundation of China(51507116)

上,提出一种计及电压稳定的自适应协调低频减载策略,并制定了控制策略的具体实施流程。通过仿真对比自适应 UF/VLS 策略<sup>[18]</sup>和传统 UFLS 方案<sup>[19]</sup>,验证了所提策略的有效性及其优越性。

## 1 频率和电压稳定性分析

本节详述了系统发生故障后,针对频率以及电压进行稳定性分析的有效方法。

### 1.1 频率稳定性分析

当系统处在功率不平衡状态时,其表现形式通常为频率失稳。本文的频率稳定分析是应用广域测量系统 WAMS(Wide Area Measurement System)所能量测的实时频率变化率及电压数据,动态估计扰动后的实际功率缺额,基于此对故障进行分类。

#### 1.1.1 功率扰动量估计

考虑到系统在受扰后的瞬时母线电压会骤降,电压骤降在扰动初期(1~2 s内)将对负荷的有功产生主导性影响<sup>[5]</sup>。因此计及这一影响对功率缺额计算式做出修正以提高计算精度,如式(1)所示。

$$\Delta P = T_{\text{IT}} \frac{df_{\text{col}}}{dt} + \sum_{j=1}^M P_{10,j} \left( \frac{U_j}{U_{0,j}} - 1 \right) \quad (1)$$

其中, $T_{\text{IT}}$ 为系统惯性时间常数; $f_{\text{col}}$ 为系统惯量中心频率; $M$ 为负荷母线数; $P_{10,j}$ 为第 $j$ 条负荷母线扰动前有功功率; $U_{0,j}$ 为第 $j$ 条负荷母线扰动前瞬时电压; $U_j$ 为第 $j$ 条负荷母线扰动后瞬时电压。

当系统发生机组脱网事故时,其惯量计算便不再计及该已脱网的机组,只需要考虑所有在网发电机组的惯性。而当受端区域与主网解列后,主网往往会从功率缺额转变为功率过剩状态,此时主网的惯量计算也只需考虑主网中所有在网机组的惯性。

#### 1.1.2 频率阈值的确定

依据《电力系统自动低频减负荷技术规定》<sup>[20]</sup>,为有效延缓频率下降,减载的启动阈值宜取高值。同时还要考虑旋转备用的启动时延,以及避免因临时性频率降低所导致的不必要动作。因此,本文的减载启动阈值整定为 49.5 Hz,即当系统惯量中心频率下降至 49.5 Hz 时,实施减载控制。

#### 1.1.3 故障扰动分类

本文基于系统有功缺额(即功率扰动量)对故障扰动进行分类,扰动程度的严重与否通过对系统有功缺额同扰动量阈值  $\Delta P_T$  的比较来判断。 $\Delta P_T$  是系统中发电机和负荷间的最大失配功率,通常将其设为系统频率降至 48.0 Hz 时的有功缺额值。通过对比  $\Delta P$  和  $\Delta P_T$  可将故障分为以下 2 种情况。

a. 当  $\Delta P > \Delta P_T$  时,判定系统故障为严重故障。此时减载控制措施的启动主要为了尽快地恢复系统频率至正常安稳范围。

b. 当  $\Delta P < \Delta P_T$  时,判定系统故障为一般故障。在

紧急控制过程中,一般故障往往不会立即对系统频率稳定性造成严重威胁。

在上述 2 种故障中,系统稳定性均需要进一步地通过电压稳定性分析作出判定。

### 1.2 电压稳定性分析

由于电压具有强非线性的特征,在系统受扰初期,电压失稳往往没有过多表征,通常先缓慢地降低,而当其降落至临界点时骤然发生崩溃<sup>[19]</sup>。电压失稳机理可以归结为负荷为维持有功平衡而自动调节其导纳特性和网络输送能力的有限性共同作用的结果,其根本原因是负荷功率需求超出了系统供电能力,因此减载是电压稳定控制最有效的方法之一。

在减载中,通过单一地设置电压阈值来监测系统是否失稳,其可靠程度不高,易造成失稳误判。因此,本文采用网损灵敏度指标获取电压薄弱区域的信息,用以指导减载过程的选址定容,并应用其判定系统能否在扰动后恢复正常的负荷裕度。

#### 1.2.1 有功网损灵敏度

电压失稳的一个特征是系统网损的突然增大。当考虑负荷节点处有功变化对系统网损的影响时,可以得到网损灵敏度<sup>[19]</sup>  $dP_L/dP$ 。当系统随着负荷的加重到达临界点时,网损灵敏度将趋于无穷大。若再增加负荷节点的功率需求,系统所发出的功率将完全被传输线路所消耗,负荷节点电压将迅速下降。因此本文应用网损灵敏度来指示电压稳定性。

系统中功率损耗应等于所有节点注入功率之和:

$$\begin{cases} S_L^* = \sum_{i,j} (Y_{ij}^* U_i^* U_j^*) \\ P_L = f_{\text{nl}}(\delta, U) \end{cases} \quad (2)$$

其中,“\*”表示共轭; $S_L$ 为系统中的网损; $Y_{ij}$ 为线路  $i-j$  的导纳值;节点  $i$  和  $j$  为系统中相连的 2 个节点; $U_i$  和  $U_j$  分别为节点  $i$  和  $j$  的电压值; $P_L$  为节点有功功率; $\delta$  为功角参数; $U$  为电压参数。

根据式(2)和系统潮流方程可以推导得出网损灵敏度,用矩阵形式表示为:

$$\begin{bmatrix} \frac{dP_L}{dP} \\ \frac{dP_L}{dQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \delta}{\partial P} & \frac{\partial U}{\partial P} \frac{1}{U} \\ \frac{\partial \delta}{\partial Q} & \frac{\partial U}{\partial Q} \frac{1}{U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \delta} \\ \frac{\partial P_L}{\partial U} U \end{bmatrix} = - [J^T]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \delta} \\ \frac{\partial P_L}{\partial U} U \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $dP_L/dP$  和  $dP_L/dQ$  分别为有功、无功网损灵敏度; $J$  为系统雅可比矩阵; $\partial P_L/\partial \delta$  和  $\partial P_L/\partial U$  分别为有功功率对功角、电压的灵敏度,其计算如式(4)所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial P_L}{\partial \delta_j} = 2 \sum_{i=1}^N (U_i G_{ij} U_j \sin \delta_{ij}) \\ \frac{\partial P_L}{\partial U_j} U_j = 2 \sum_{i=1}^N (U_i G_{ij} U_j \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $N$  为系统的节点数;  $G_{ij}$  为线路  $i-j$  的电导值;  $\delta_{ij}$  为线路  $i-j$  的功角值。

可见, 通过求取  $\partial P_L / \partial \delta$  和  $\partial P_L / \partial U$  就可以计算得到有功网损灵敏度值。据式(3)可知, 网损灵敏度同潮流雅可比矩阵  $J$  有着紧密关联。根据电力系统静态稳定分析理论, 当系统运行状态接近电压失稳临界点时, 矩阵  $J$  的行列式值近似为 0, 故网损灵敏度值将趋于无穷大。实际应用中, 当网损灵敏度值超过某一阈值时, 可近似认为系统接近电压崩溃状态。

### 1.2.2 网损灵敏度特性分析

在系统功率因数不变的情况下, 网损灵敏度值和节点电压随负荷变化的示意图如图 1 所示。

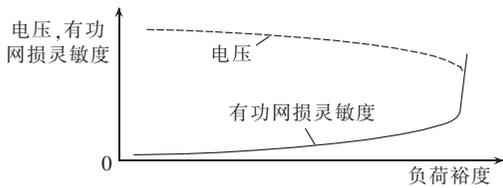


图 1 有功网损灵敏度和电压随负荷变化的示意图

Fig.1 Active power loss sensitivity and voltage vs. load

从图 1 可以看出, 随着负荷增加, 节点电压幅值逐渐下降而有功网损灵敏度开始增大, 但是变化不是很显著; 直到系统接近临界状态时, 有功网损灵敏度才迅速增加并趋于无穷大, 此时电压临近失稳。各节点有功网损灵敏度值的计算只需在潮流计算基础上再做少量计算, 除按式(4)计算有功网损对功角及电压的灵敏度外, 再进行一次前代和回代即可。但从图 1 中的曲线可知, 在负荷较轻时, 该指标随着负荷增长变化不明显, 只在接近临界点时会突然增加, 线性度较差。这样的指标在对电压稳定进行监测时, 只有当系统接近崩溃点时才会有明显改变。

若关于  $\alpha$  的函数  $f(\alpha)$  具有的特征是其对  $\alpha$  变化的比值  $f(\alpha)/(df/d\alpha)$  呈现线性, 则称该类函数具有“二次型”特性。基于“二次型”函数可以提出相应的归一化二阶指标:

$$F_{PIs} = \frac{1}{F_0} \frac{f(\alpha)}{df/d\alpha} \quad (5)$$

其中,  $F_0$  为起始负荷点处  $f(\alpha)/(df/d\alpha)$  的值。

通过对网损灵敏度指标进行二阶改造, 可以有效改善该指标的线性度<sup>[19]</sup>。在实际中发现, 网损灵敏度的倒数具有“二次型”特性, 应用其构造二阶指标具有很好的线性特性, 如图 2 所示。

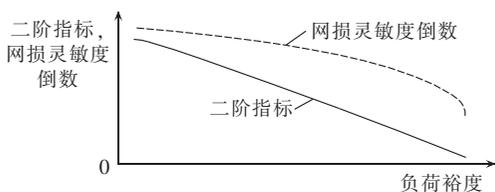


图 2 有功网损灵敏度二阶指标示意图

Fig.2 Schematic diagram of second order index of active power loss sensitivity

从图 2 可以看出, 经二阶方法改造后的网损灵敏度曲线呈现很好的线性度。基于其线性好、计算速度快的特征, 可将其应用于电压稳定的在线监测以及减载动作后的稳定性评估。由文献[19]可知, 基于网损灵敏度的二阶指标具有计算便捷的优点, 可实现在线应用(其计算时间控制在 1~2 s 以内, 满足低频减载时间尺度的要求)。

## 2 协调减载控制策略制定

### 2.1 减载量占有功缺额的比例分析

在进行减载时, 所切除的负荷量一般应小于总的有功缺额, 而功率差由负荷调节效应来平衡, 或是通过事后调度来增发电量<sup>[3]</sup>, 这样能有效减少紧急控制过程中的负荷损失, 从而降低控制代价。

当有功缺额为  $\Delta P$  时, 应该切除的负荷量  $P_{LS}$  可按式(6)计算<sup>[21]</sup>:

$$P_{LS} = \frac{\Delta P - K_{LD}^*(1 - f_{res}^*)P_{LN}}{1 - K_{LD}^*(1 - f_{res}^*)} \quad (6)$$

其中,  $K_{LD}^*$  为系统整体的负荷频率调节系数, 一般为 1~3;  $f_{res}^*$  为减载后系统的稳态频率标幺值;  $P_{LN}$  为系统总的有功负荷值。

将式(6)等号左右两边同时除以  $\Delta P$ , 可得:

$$\frac{P_{LS}}{\Delta P} = \frac{1 - K_{LD}^*(1 - f_{res}^*) \frac{P_{LN}}{\Delta P}}{1 - K_{LD}^*(1 - f_{res}^*)} \quad (7)$$

根据式(7)可以计算出系统频率想恢复到  $f_{res}^*$  时所应切除的负荷量占有功缺额的比例。本文将减载后的恢复频率  $f_{res}$  设为 49.6 Hz, 得到  $P_{LS}/\Delta P$  随有功缺额变化的曲线, 如图 3 所示。

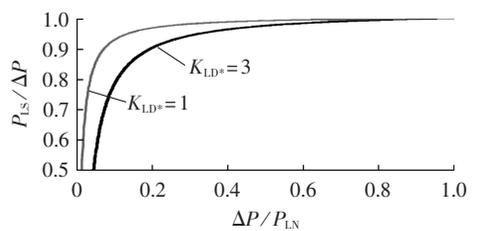


图 3 减载比例随有功缺额的变化情况

Fig.3 Load shedding ratio vs. power deficiency

对图 3 进行分析可知,  $P_{LS}/\Delta P$  在 0.75~0.95 之间时可以涵盖大部分的有功缺额。因此, 本文认为在紧急控制过程中, 系统最多切除 0.85  $\Delta P$  的负荷量即可满足在事故中的稳定性恢复要求, 而剩余 0.15  $\Delta P$  的有功缺额则由事故后的相应措施(如及时调度机组发电出力)来予以解决。

### 2.2 减载控制策略实施流程

本文制定的自适应减载方案兼顾频率稳定和电压稳定的性能恢复与评估。当系统发生严重故障时, 控制措施分为 2 个阶段来实施, 阶段 1 主要是保障系统的频率稳定, 阶段 2 则主要保证系统电压稳定;

而当系统发生一般故障时,则跳过阶段 1,直接针对电压稳定性施行有效措施。

策略实施的主要流程为:根据式(1)精确计算故障后系统中的有功缺额,并依据扰动程度分为严重故障或一般故障;计算各阶段的减载总量,并确定动作地点和分配相应的减载量;施行减载控制并对减载后的系统稳定性作出评估。

### 2.2.1 严重故障情况

当发生严重故障时,将减载控制措施设置为 2 个阶段,阶段 1 主要是保证系统频率稳定,此阶段的系统减载总量设为  $P_{LS1}=1.05(\Delta P-\Delta P_T)$ 。

当频率下降时,负荷的  $K_L$  越大,其有功吸收量削减得越快。因此,基于此负荷特性指导减载过程的选址定容,采取优先切除  $K_L$  较小负荷,能够在频率下降时充分利用负荷频率调节效应,从而减少负荷吸收的有功值,有助于缓解功率不平衡状态和快速恢复稳态频率。据文献[22]可知,在实际中应用微机型低频减载装置能够实时准确地获取系统每条负荷母线的频率调节系数。

负荷母线  $i$  的减载量  $P_{LS1,i}$  由式(8)进行计算。

$$P_{LS1,i} = \frac{1/K_{Li}}{\sum_{i \in N_k} (1/K_{Li})} P_{LS1} \quad (8)$$

其中,  $K_{Li}$  为负荷母线  $i$  的频率调节系数;  $N_k$  为系统中  $K_L$  值从小到大排序前 30% 的负荷母线集合。

阶段 2 主要是保证系统电压稳定。根据 2.1 节的分析,此阶段的减载量设为  $P_{LS2}=0.85(\Delta P-P_{LS1})$ 。

薄弱节点(关键节点)和不稳定区域的判定是事故确定和分析的前提,也是电压安全评估的重要组成部分,本文选用网损灵敏度指标判定薄弱节点以及电压不稳定区域。将各负荷母线的  $dP_L/dP$  值从大到小依次排序,来指导减载中的选址定容。 $dP_L/dP$  值越大的母线则对应分配的减载量越多,其中负荷母线  $j$  的减载量  $P_{LS2,j}$  由式(9)进行计算。

$$P_{LS2,j} = \frac{(dP_L/dP)_j}{\sum_{j \in N_v} (dP_L/dP)_j} P_{LS2} \quad (9)$$

其中,  $(dP_L/dP)_j$  为负荷母线  $j$  的网损灵敏度;  $N_v$  为指标排序前 30% 的母线所组成的不稳定区域集合。

### 2.2.2 一般故障情况

当发生一般故障时,此类程度的扰动在紧急过程中将不会导致系统频率的直接崩溃。因此,主要考虑该类故障下是否会出现电压的局部失稳,进行阶段 2 的减载控制,并应用网损灵敏度的二阶指标对减载后的稳定性作出评估。减载流程同上述的阶段 2,但在减载量上存在差别:  $P_{LS2}^*=0.85\Delta P$ 。

### 2.2.3 减载策略的实施流程图

综上所述,所提减载策略的具体实施流程如图 4 所示。

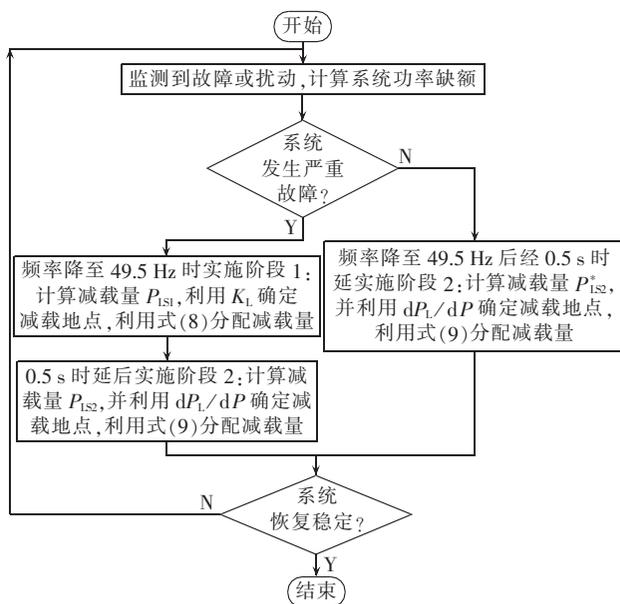


图 4 减载控制策略的实施流程

Fig.4 Flowchart of load shedding strategy

## 3 仿真分析

### 3.1 算例系统

本文采用 IEEE 39 节点系统进行仿真分析,发电机组、变压器和线路的参数详见文献[19]。发电机组采用 6 绕组模型,励磁系统采用 IEEE 的 F 型模型,调速器采用再热式汽轮机模型,母线 3 和母线 18 处采用动态负荷模型,其余母线处均采用计及电压和频率的静态负荷模型。

基于低阶 SFR 简化模型求得该算例系统的功率扰动量阈值  $\Delta P_T=6.92$  p.u.。在仿真分析中通过设置严重故障和一般故障 2 类情况,来验证所提协调减载策略的有效性。

### 3.2 系统出现严重故障

当发生严重故障时,系统有功缺额将大于功率扰动量阈值,此时系统整体的频率稳定性将受到威胁,需要采取相应的减载措施来避免频率失稳。

在  $t=6.0$  s 时,机组 38 因故障而停止出力,此时利用式(1)求得  $\Delta P=8.48$  p.u.,即实际扰动量大于阈值,共 1.56 p.u.,判定系统出现严重故障。系统惯量中心频率和部分急剧下跌的母线电压变化情况见图 5,图中电压为标么值,后同。可知此故障条件下的系统频率和电压均趋于失稳,需实施减载控制策略。

基于负荷频率调节效应,根据式(8)选取如表 1 (表中  $P_{LS}$  为标么值,后同)所述的 6 条负荷母线实施减载,当频率降至 49.5 Hz 时进行减载控制,阶段 1 的减载总量应为 1.638 p.u.。从图 4 可知阶段 1 对应的减载时刻应为 7.28 s。

利用式(3)计算阶段 1 减载后的各负荷节点网损灵敏度  $dP_L/dP$ ,从表 1 可知母线 20 为该故障下

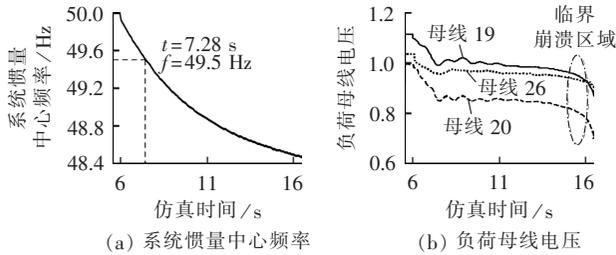


图 5 严重故障下频率和电压的变化曲线

Fig.5 Variation of frequency and voltage when serious fault occurs

表 1 严重故障下减载过程的选址定容  
Table 1 Location and allocation of load shedding when serious fault occurs

阶段	母线	$K_{Li}$	$P_{Lsi,j}$	阶段	母线	$dP_L/dP_j$	$P_{Lsj}$
阶段 1	15	3.151	0.334	阶段 2	20	1.187	1.209
	29	3.615	0.291		19	0.962	0.980
	8	3.914	0.269		26	0.917	0.934
	3	3.969	0.265		8	0.894	0.911
	20	4.180	0.252		5	0.889	0.905
	28	4.632	0.227		16	0.861	0.877

系统的最薄弱节点,根据网损灵敏度排序选取母线 20、19、26、8、5、16 共 6 条负荷母线组成系统电压不稳定区域集合  $N_V$ ,并应用式(9)分配阶段 2 的减载量。计及网损灵敏度计算时间和信号传输过程的时延  $t_d=0.5\text{ s}$ ,阶段 2 减载过程将在 7.78 s 时刻实施,其减载地点及减载量的分配情况如表 1 所述。

经阶段 2 减载后的电压变化情况如图 6 所示,可知各临界状态下的母线电压将逐渐恢复至稳定范围。利用网损灵敏度二阶指标的线性特性估算两阶段减载控制实施后的系统负荷裕度  $\lambda=13.8\%$ ,验证了在减载紧急控制中应用  $dP_L/dP_j$  指导选址定容过程的有效性。

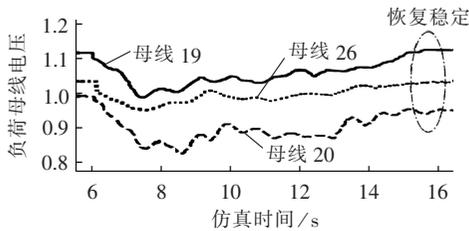
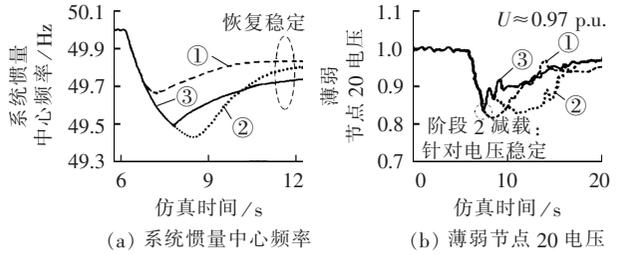


图 6 阶段 2 减载后负荷母线电压的变化情况

Fig.6 Voltage of load bus after load shedding in stage 2

将本文方法同文献[18]中提出的自适应 UF/VLS 策略和传统 UFLS 方案<sup>[19]</sup>进行对比分析。传统 UFLS 方案是应用确定性方法,即不管扰动量的多少,均按事前设定的频率阈值及相应减载比例进行实施,易造成负荷过切等问题。而自适应 UF/VLS 策略<sup>[18]</sup>是通过结合传统的 UVLS,利用故障前估算的负荷母线处电压灵敏度来指导减载,该方案对于不同程度的故障其针对性不够,在保证系统电压稳定方面的可靠

性程度较低。各方案实施后的系统频率和薄弱节点电压的变化情况如图 7 所示,图 7(b)中  $U\approx 0.97\text{ p.u.}$  表示本文方案实施后最终稳定的电压值。各方案评价指标值的对比如表 2 所示,表中减载量为标么值,后同。



① 传统 UFLS, ② 自适应 UF/VLS, ③ 本文方案

图 7 各方案实施后系统频率和薄弱节点电压的变化

Fig.7 Variation of system frequency and weak node voltage after implementation of strategy

表 2 各减载方案的评价指标值对比

Table 2 Comparison of evaluation index values among different load shedding strategies

方案	减载量	稳态频率/Hz	P-V 裕度/%
传统 UFLS	8.080	49.83	11.61
自适应 UF/VLS	7.962	49.79	12.96
本文方案	7.454	49.74	13.79

随着减载策略制定要求的不断提高,更加应当考虑到其可靠性与经济性的协调统一,因此评价一个减载策略的优劣性不仅要体现在稳态频率上,同时还需关注减载量的多少和考虑局部电压的稳定性问题。减载量方面,本文方案具有明显优势,能够以较小的控制代价得到满意的稳态频率。在减载阶段 2 通过应用  $dP_L/dP_j$  值指导选址定容过程,能够有效获取系统薄弱节点和电压不稳定区域的信息,从而有针对性地解决故障后的电压局部失稳问题,并恢复系统的负荷裕度。同时,本文方案的频率恢复过程能够满足条例规定的安稳约束<sup>[20]</sup>。经综合分析可以知道,本文方案更能够兼顾经济性和可靠性的要求,能以最小控制代价来保障系统频率及局部电压的稳定。

### 3.3 系统出现一般故障

在  $t=6.0\text{ s}$  时,机组 34 因故障而停止出力,应用式(1)求得此时系统的不平衡功率为 6.45 p.u.,其值小于功率扰动量阈值,故判定系统出现一般故障。应用低阶 SFR 简化模型预测该扰动下系统稳态频率约为 48.35 Hz,不会在紧急控制过程中发生频率崩溃。

因此,考虑到该故障下的电压局部稳定问题,直接针对电压稳定性施行有效措施。应用式(3)计算各负荷节点的网损灵敏度  $dP_L/dP_j$ ,从表 3 可知该故障下的最薄弱节点为母线 20,根据灵敏度指标排序选取母线 20、16、19、15、23、24 共 6 条负荷母线组成

系统电压不稳定区域集合  $N_V$ , 并应用式(9)确定减载量的分配。在 11.8 s 时频率降至减载启动阈值, 计及灵敏度计算时间和信号传输的时延  $t_d$ , 减载紧急控制将在 12.3 s 时实施, 其减载地点及减载量的分配情况如表 3 所述。

表 3 一般故障下减载过程的选址定容

Table 3 Location and allocation of load shedding when normal fault occurs

阶段	母线	$dP_L/dP_j$	$P_{L\Sigma j}$	阶段	母线	$dP_L/dP_j$	$P_{L\Sigma j}$
阶段 2	20	1.052	1.147	阶段 2	15	0.763	0.832
	16	0.927	1.011		23	0.759	0.827
	19	0.871	0.950		24	0.657	0.716

经减载后的电压变化情况如图 8 所示, 可知  $N_V$  中的负荷节点电压已恢复至稳定范围。而计算减载后的系统负荷裕度为  $\lambda = 12.28\%$ , 验证了电压稳定问题得到了有效解决。如图 8 所示, 系统频率在减载后同样也恢复至紧急控制过程中的可接受水平。

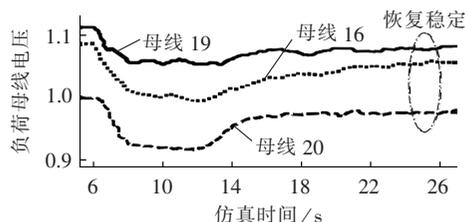
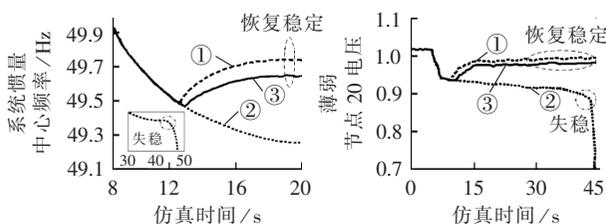


图 8 减载后的负荷母线电压变化情况

Fig.8 Voltage of load bus after load shedding

同样地, 将本文方案同另外的减载策略<sup>[18-19]</sup>做对比分析。各方案下系统频率和薄弱节点电压的恢复情况如图 9 所示。各方案评价指标值的对比如表 4 所述。可以看出, 传统方案并不考虑扰动功率的大小, 其减载总量的故障针对性较差。自适应 UF/VLS 策略尽管设置有足够的减载量, 却仍旧出现了因电压



(a) 系统惯量中心频率

(b) 薄弱节点 20 电压

① 传统 UFLS, ② 自适应 UF/VLS, ③ 本文方案

图 9 各方案实施后系统频率和薄弱节点电压的变化

Fig.9 Variation of system frequency and weak load voltage after implementation of strategy

表 4 各减载方案的评价指标值对比

Table 4 Comparison of evaluation index values among different load shedding strategies

方案	减载量	稳态频率/Hz	P-V 裕度/%
传统 UFLS	6.217	49.75	14.21
自适应 UF/VLS	6.080	系统崩溃	0
本文方案	5.483	49.63	12.28

失稳而导致的系统崩溃, 这是由于该方法的电压稳定判据过于简单(电压低于 0.8 p.u. 时进行减载)。本文所提方案能够以较少的减载量有效保证系统频率及电压的稳定性, 并使负荷裕度恢复至正常范围。

## 4 结论

随着电网规模的不断发展, 设计一种能够协同保持系统频率和电压稳定的控制措施显得尤为重要。本文提出一种计及电压稳定的自适应协调低频减载策略以应对新形势。

该策略通过动态计算功率缺额对故障扰动的严重程度进行分类, 有针对性地实施不同的控制措施, 以期兼顾频率稳定和电压稳定。若发生严重故障, 需要进行 2 个阶段的减载, 先基于各负荷母线的频率调节效应指导选址定容, 后再应用  $dP_L/dP_j$  获取电压薄弱区域信息以确定减载点和分配减载量; 若发生一般故障则直接进行阶段 2 的减载过程。

通过对仿真结果进行对比分析, 可知所提策略可以自适应不同程度的故障类型, 并能在兼顾经济性与可靠性要求的同时, 及时有效地保证系统频率稳定以及各母线处的电压稳定。需指出, 电力系统的负荷特性多样且复杂, 对减载效果影响也较大, 因此本文策略在实际电网的适用性还需进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 张东霞, 姚良忠, 马文媛. 中外智能电网发展战略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31):1-15.  
ZHANG Dongxia, YAO Liangzhong, MA Wenyuan. Development strategies of smart grid in China and abroad[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31):1-15.
- [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[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1):8-16.  
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts part 1 from isolated defense lines to cooperative defending[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1):8-16.
- [3] 汤涌. 电力系统安全稳定综合防御体系框架[J]. 电网技术, 2012, 36(8):1-5.  
TANG Yong. Framework of comprehensive defense architecture for power system security and stability[J]. Power System Technology, 2012, 36(8):1-5.
- [4] 杨德友, 蔡国伟. 减载控制灵敏度及其在广域低频保护中的应用[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3):124-128, 135.  
YANG Deyou, CAI Guowei. Load shedding control sensitivity and its applications in wide-area low-frequency protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3):124-128, 135.
- [5] 宋兆欧, 刘俊勇, 刘友波, 等. 计及动态修正的自适应广域低频减载[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4):95-100, 119.  
SONG Zhaoou, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. WAMS based adaptive UFLS considering dynamic correction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4):95-100, 119.
- [6] 邓继宇, 刘俊勇, 袁明友, 等. 基于动态负荷特性指标化的集中式低压减载方案[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(8):72-76.  
DENG Jiyu, LIU Junyong, YUAN Mingyou, et al. Centralized un-

- der voltage load shedding based on dynamic load characteristic index[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8): 72-76.
- [7] ADEWOLE A C, TZONEVA R, APOSTOLOV A. Adaptive under-voltage load shedding scheme for large interconnected smart grids based on wide area synchrophasor measurements[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(8): 1957-1968.
- [8] KAFFASHAN I, AMRAEE T. Probabilistic under voltage load shedding using point estimate method[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(15): 2234-2244.
- [9] 张执超, 王增平, 方攀宇. 基于频率和电压稳定的紧急控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 149-155.  
ZHANG Zhichao, WANG Zengping, FANG Panyu. Emergency control strategy based on frequency and voltage stability[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 149-155.
- [10] 任先成, 薛禹胜, 韦化. 低频低压切负荷布点及轮次的优化与协调[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 1-7.  
REN Xiancheng, XUE Yusheng, WEI Hua. Optimization and coordination of UF/UVLS placement and multi step load shedding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 1-7.
- [11] 李晔, 张保会. 基于负荷无功电压响应的切负荷控制决策优化[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 106-111.  
LI Ye, ZHANG Baohui. Load shedding scheme optimization based on load voltage and reactive power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 106-111.
- [12] TANG J, LIU J, PONCI F, et al. Adaptive load shedding based on combined frequency and voltage stability assessment using synchrophasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 2035-2047.
- [13] HOSEINZADEH B, FARIA DA SILVA F M, BAK C L. Adaptive tuning of frequency thresholds using voltage drop data in decentralized load shedding[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 2055-2062.
- [14] 侯玉强, 方勇杰, 杨卫东, 等. 综合电压频率动态交互影响的自动减负荷控制新方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 24-28.  
HOU Yuqiang, FANG Yongjie, YANG Weidong, et al. A new method of automatic load shedding control based on the voltage and frequency dynamics interaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 24-28.
- [15] 徐琳, 卢继平, 汪洋, 等. 电力系统节点电压稳定指标的研究[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 26-30.
- XU Lin, LU Jiping, WANG Yang, et al. Research on nodal voltage stability index of power system[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 26-30.
- [16] 李国庆, 姜涛, 徐秋蒙, 等. 基于局部电压稳定指标的裕度灵敏度分析及应用[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(4): 1-5, 30.  
LI Guoqing, JIANG Tao, XU Qiumeng, et al. Sensitivity analysis based on local voltage stability margin and its application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(4): 1-5, 30.
- [17] NIZAM M, MOHAMED A, HUSSAIN A. Dynamic voltage collapse prediction in power systems using power transfer stability index[C]//2006 IEEE International Power and Energy Conference. Putra Jaya, Malaysia: [s.n.], 2006: 246-250.
- [18] SEYEDI H, SANAYE-PASAND M. New centralized adaptive load-shedding algorithms to mitigate power system blackouts[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2009, 3(1): 99-114.
- [19] 周双喜. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 108-112.
- [20] 电力系统自动低频减负荷技术规定: DL/T 428—2010[S]. 北京: 国家能源局, 2011.
- [21] 杨冠城. 电力系统自动装置原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 150-154.
- [22] 熊小伏, 周永忠, 周家启. 计及负荷频率特性的低频减载方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 48-51.  
XIONG Xiaofu, ZHOU Yongzhong, ZHOU Jiaqi. Study of under frequency load shedding scheme based on load frequency characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 48-51.

#### 作者简介:



李 顺

李 顺(1993—),男,湖南益阳人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制、柔性交直流输电(**E-mail**: piaocool007@163.com);

廖清芬(1975—),女,浙江衢州人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统运行与控制(**E-mail**: qfliao@whu.edu.cn);

刘涤尘(1953—),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制、电力系统规划(**E-mail**: dcliu@whu.edu.cn)。

## Adaptive coordinated low frequency load shedding strategy considering voltage stability

LI Shun, LIAO Qingfen, LIU Dichen, TANG Fei

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The power grid often operates in the state of critical stability in order to improve the utilization rate of resource, the large scale blackout often occurs when power system operates with heavy load and which is mostly manifested as system collapse caused by the combination of multiple electrical quantities. An adaptive coordinated low frequency load shedding strategy with the consideration of voltage stability is proposed. The severity of disturbance is classified by the dynamic calculation value of power deficiency for choosing different control strategies. Two stage load shedding is needed when serious fault occurs, the location and the allocation in stage 1 is obtained according to the frequency adjustment effect of each load bus, the active power loss sensitivity is adopted to obtain the information of voltage weak area, and load shedding in stage 2 is implemented after time delay. While load shedding in stage 2 is directly implemented when normal fault occurs. Simulation verifies the effectiveness and superiority of the proposed strategy which can be adaptive to fault disturbance with different severity and can effectively and timely ensure the system frequency stability and voltage stability of each bus.

**Key words:** coordinated load shedding strategy; frequency stability; voltage stability; adaptive control