

DOI: 10.7667/PSPC151323

## 基于 WAMS 的自适应低频减载动态优化策略

李顺<sup>1</sup>, 廖清芬<sup>1</sup>, 刘涤尘<sup>1</sup>, 李昂<sup>2</sup>, 岑炳成<sup>1</sup>, 王佳丽<sup>1</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518001)

**摘要:** 在《电力安全事故应急处置和调查处理条例》(599号令)中,提出了在故障处理过程中的负荷切除量等同于故障损失负荷量,这要求电网在安全稳定运行的前提下尽可能地少切或不切负荷,以降低事故控制代价。因此,提出计及负荷频率调节效应、P-V特性和负荷重要度的减载贡献因子来有效指导低频减载过程中的选址定容。通过分析电压突变因素对不平衡功率的影响以提高功率缺额计算式精度,依据系统频率变化率的梯度变化逐轮次地动态优化减载量,以期充分发挥系统频率的自恢复调节能力。IEEE 39节点系统仿真分析表明,所提出的低频减载动态修正优化策略,能够在减少切负荷控制代价的同时改善系统频率恢复水平,从而兼顾频率紧急控制的经济性与可靠性要求。

**关键词:** 频率恢复; 减载贡献因子; 599号令; 广域测量系统; 自适应控制

### WAMS based dynamic optimization of adaptive under-frequency load shedding

LI Shun<sup>1</sup>, LIAO Qingfen<sup>1</sup>, LIU Dichen<sup>1</sup>, LI Ang<sup>2</sup>, CEN Bingcheng<sup>1</sup>, WANG Jiali<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518001, China)

**Abstract:** The rule No.599 of power grids in China indicates that the shedding load is equivalent to the failure loss load, which requires less load-shedding as much as possible under the premise of security and stability, to reduce the cost of frequency accident control. Therefore, in this paper, the load-shedding contribution factor based on frequency regulation effect, P-V characteristic and the importance of the load is designed to indicate the placement of load shedding and the allocation of the load to be cut. The influence of voltage leap on unbalanced power is analyzed to improve the calculation accuracy. A dynamic correction scheme is described to adjust load-shedding amount of each steps according to change rate of frequency derivative, to fully utilize the self-recovery capacity of system frequency. Simulation based on IEEE 39-bus system shows that the new strategy could reduce the load shedding amount and improve frequency recovery process, in which both the reliability and economy are taken into consideration.

**Key words:** frequency recovery; load-shedding contribution factor; the rule No.599; WAMS; adaptive control

## 0 引言

低频减载(UFLS)是抑制频率事故产生的最有效方法,可在大量不平衡功率情况下保证频率稳定。随着远距离大容量的跨区输电网络的建设,用户对供电安全性提出了更高要求。新颁布的《电力安全事故应急处置和调查处理条例》<sup>[1]</sup>(599号令),以法律形式对电力安全事故的调查处理做出详细规定,明确了依据故障中负荷切除量作为事故等级划

分标准的主要评定指标,指出稳控减载量等同于故障负荷损失量,这代表在今后的事故处理中,在保证系统安稳运行的条件下尽可能少地对负荷下切除命令。因此,需针对传统减载方案来设计优化策略,在满足约束条件下降低控制代价和改善减载效果,保证频率稳定恢复的快速性及优质性。

在制定减载控制策略时,减载量、减载地点和减载时间等参数的确定将直接影响频率稳定恢复的速度与效果,它们是评价 UFLS 方案优劣的三大关键因素<sup>[2]</sup>。国内外诸多学者对 UFLS 策略制定问题进行了深入探讨与研究。在文献[2]中详细评述了近年来国内外在 UFLS/UVLS 方面所做的研究工作,

**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”

并对相关领域的研究发展方向提出了展望。文献[3]指出通过优先切除频率调节系数小的线路,可以加快频率恢复与稳定。文献[4]利用基于广域测量的系统惯性中心频率变化率来实时估计功率缺额,但未考虑节点电压突变影响,其计算精度有待提升。文献[5]所提方案将功率缺额作为减载基本段负荷切除量并予以一次性切除,这不能有效发挥系统的频率自恢复能力。在文献[6]中,通过监测首轮频率变化率来优化减载自适应控制的各轮减载量分配,但并没有考虑后备轮的应用,也尚未讨论 UFLS 的选址定容方法。文献[7]研究了频率时空分布对低频减载的影响,指出集中切大用户工业负荷可快速恢复系统频率。文献[8]提出一种兼顾考虑系统频率恢复性能和切负荷量最小的 UFLS 优化模型,同时考虑各种预设场景下的风险概率。文献[9]结合 599 号令中相关规定,在过载切负荷策略制定中提出利用风险评估对控制措施进行评价筛选的方法。

目前,主流的减载策略制定还是以“离线仿真,在线匹配”<sup>[10-12]</sup>为主,对于具体稳定问题的分析和控制若按照传统的确定性方法分析,将很难在保证电网安稳运行前提下的经济性最优。因此,本文在归纳新形势下减载策略制定的应对方法基础上,研究了选址定容中应用减载贡献因子来改善受扰后频率稳定恢复的效果,并制定了基于广域测量的自适应低频减载动态优化策略,并以 IEEE 39 节点系统解决大量不平衡功率稳定问题的低频减载策略实施为例,对所提方案进行阐释。

## 1 新形势下的低频减载策略制定

《DL755-2001 电力系统安全稳定导则》<sup>[13]</sup>和 599 号令分别从电网供电可靠性和经济性角度对电网规划、系统运行与控制等方面提出严格要求。传统 UFLS 策略的实施,能够保证系统发生最严重事故时的频率稳定性,但同时也会导致系统在一般事故中极易出现负荷过切,缺乏时效性。

PMU 装置广泛应用于电力系统中,极大地促进了跨区电网广域测量系统的发展。而电力网架结构的不断扩大,其稳定控制更加要以系统整体作为考虑。WAMS 可以实时同步地测量广域电网运行状态,并依托快速网络信道来汇总量测数据,这为实现不同故障场景下自适应减载控制的实时匹配创造了条件。

在安稳条例中提出在频率稳定恢复过程时要兼顾快速性和优质性的提升,故减载策略制定有必要考虑多因素影响的控制措施来应对新要求:

1) 选址定容过程应当有效地利用负荷自身的

特性指标来改善减载后的频率恢复过程,从而更为快速地恢复稳态频率。

2) 建立基于 WAMS 量测的自适应低频减载控制,以实时匹配系统不同故障工况下的功率缺额,并缩短减载控制时延,从而实现能满足高精度量测、同步性稳控的跨区电网分散减载策略。

3) 在满足安稳约束条件下,尽可能地利用系统自身频率调节能力来降低切负荷量,有效地减少负荷过切和频率超调的概率,提高系统运行经济性的同时最大限度地保证供电可靠性。

## 2 节点减载贡献因子的构建

当系统发生故障而呈现不平衡功率时,能否快速且平稳地恢复系统频率至稳定值是评价低频减载方案好坏的关键<sup>[14]</sup>。目前,大多数低频减载方案所存在的问题是将系统负荷当作综合负荷来考虑,尚未计及不同负荷间差异,仅按节点负荷比例来分配减载量<sup>[10]</sup>。而实际负荷是处在动态变化和存在特性差异的,因此在选址定容时应考虑到负荷差异性对频率稳定恢复所造成的差异化影响。本节综合考虑负荷频率调节效应、有功-电压特性和负荷重要度三方面差异化的影响,通过对各负荷节点的减载贡献因子进行动态计算来制定选址定容方案。

### 2.1 考虑频率调节效应的影响

负荷调节效应能在系统功率平衡遭受破坏而引起频率变化时,对负荷功率的变化进行补偿,通常利用频率调节效应系数来量化补偿作用:

$$K_L = dP_L^* / df^* = a_1 + 2a_2 f^* + 3a_3 f^{*2} \quad (1)$$

设两种负荷  $P_{L1}$  和  $P_{L2}$  的  $K_{L1} > K_{L2}$ , 其功-频特性曲线如图 1 所示,当频率从  $f_0$  降至  $f_1$  时,其有功变化  $\Delta P_1 > \Delta P_2$ , 即负荷 1 对频率变化更为敏感。

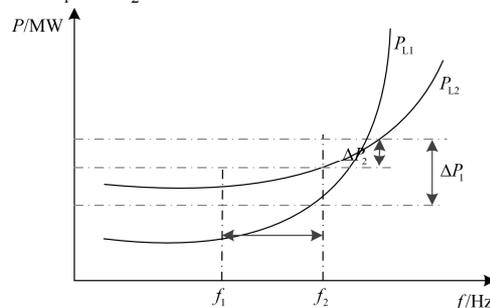


图 1 负荷的频率特性曲线

Fig. 1 Frequency characteristic curve of loads

当频率下降  $\Delta f$ , 负荷  $K_L$  越大, 其有功吸收量削减得越快。因此采取优先切除  $K_L$  较小负荷, 保留  $K_L$  较大负荷的减载方案, 能够在频率下降时充

分利用负荷频率调节效应,从而减少负载吸收的有功值,有助于减少不平衡功率和快速恢复稳态频率。

## 2.2 考虑节点有功-电压特性的影响

节点 P-V 曲线阐述了有功-电压特性,其囊括了系统网架拓扑结构、薄弱电压节点等有效信息<sup>[15]</sup>。由图 2 可知随着传输有功增加,电压趋于下降。

对全系统来说,频率降低会造成机组无功出力的削减,而无功需求反倒会略有增加。如果无功电源不足,频率下降便会引起电压下降,通常频率每减少 1% 电压将降低 0.8%~2%,电压降低会减少负荷有功吸收量,从而对频率下降起阻尼作用。

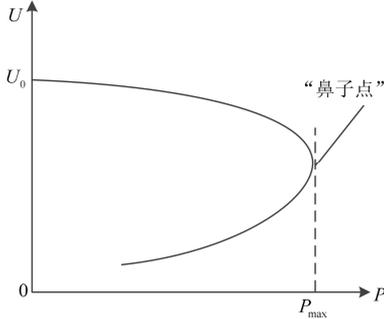


图 2 节点 P-V 特性曲线

Fig. 2 P-V characteristic curve of nodes

因此,采取适当降低节点电压水平的临时补救措施可有效缓解功率缺额的严重程度。但是要保证节点电压是在安全稳定范围内保持较小值,而且与低压减载相互协调<sup>[16]</sup>。P-V 曲线能提供灵敏度指标<sup>[17]</sup>  $dv/dp$ , 如果“鼻子点”附近的  $dv/dp$  越大,则代表该节点电压对有功变化越灵敏,实施切负荷操作后电压回升较大,对应负荷有功的增加,阻碍了频率稳定恢复。所以在满足电压稳定前提下,应当优先在  $dv/dp$  小的节点处减载,指标计算式为

$$dv_i/dp_i = p_{ti}(v_{ti} - v_{mi})/v_{ti}(p_{mi} - p_{ti}) \quad (2)$$

式(2)中,  $v_{ti}$ ,  $p_{ti}$ ,  $v_{mi}$ ,  $p_{mi}$  分别为 P-V 曲线“鼻端”前  $t$  次和“鼻端”附近的扰动后潮流计算电压及有功值。

## 2.3 考虑负荷重要性差异的影响

低频减载需考虑负荷重要度差异,通过优先切除较为次要的负荷,以尽可能地保障重要负荷的供电可靠性。

负荷重要性包括两个方面<sup>[18]</sup>: 1) 对全系统而言,不同节点可能因社会原因或安稳运行所需满足的约束条件不同而存在差异; 2) 同一节点的负荷依据重要性不同分为一类、二类和三类负荷,其供电要求和中断供电损失依次减少。因此在减载操作中,要严格保证一类负荷的供电,赋以其最高重要性权值。一般仅在全网所有节点的二类负荷全部切除仍

不能使频率恢复情况下,才允许切除较次要的一类负荷。因此负荷切除要综合考虑全网与本地两方面的重要性。

## 2.4 减载贡献因子的数学模型

根据各指标差异化的影响机理,建立减载贡献因子模型(Load-shedding Contribution Factor, LCF)如下。

$$F_i = (\beta_i \gamma_{ij} \sum_{m=1}^M \lambda_m C_m) \cdot 100\% \quad (3)$$

式中:  $F_i$  为减载综合贡献因子;  $M$  为考虑到的减载贡献因子种类个数;  $C_m$  为第  $m$  类减载贡献因子的归一化值;  $\lambda_m$  为减载综合贡献因子的各类贡献权重系数,应满足  $\sum \lambda_m = 1$ ;  $\beta_i$  为第  $i$  个负荷节点的全网重要程度权值;  $\gamma_{ij}$  为第  $i$  个负荷节点的第  $j$  类负荷的本地重要程度权值。本文考虑的贡献因子是  $C_1$  和  $C_2$ :

$$C_1 \Leftrightarrow C_{pv} = dv_i / dp_i / \sum_{j=1}^n (dv_j / dp_j) \quad (4)$$

$$C_2 \Leftrightarrow C_K = K_{Li} / \sum_{j=1}^n K_{Lj} \quad (5)$$

综上所述,减载时应当优先切除  $F_i$  值较小母线上的负荷。本节提出基于减载综合贡献因子  $F_i$  值进行减载量的加权分配方案,如式(6)、式(7)所示。

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^n F_j / F_i \quad (6)$$

$$\Delta p_{i,j} \% = \frac{\alpha_i}{\alpha_{i\sum}} \Delta P_{shed,j} / P_i \quad (7)$$

式中:  $\alpha_i$  为负荷  $i$  的减载贡献因子  $F_i$  反比参数;  $\Delta p_{i,j}$  为第  $j$  轮减载负荷  $i$  百分占比;  $\Delta P_{shed,j}$  为第  $j$  轮减载时应切除的负荷总量;  $P_i$  为负荷  $i$  的有功容量。

## 3 自适应低频减载策略的动态修正优化

### 3.1 基于 WAMS 的功率缺额改进计算

传统的功率缺额计算式是基于系统惯性中心的运动方程,利用数值计算方法求得惯性中心频率  $f_{coi}$  来估算系统不平衡功率。

$$f_{coi} = \frac{1}{T_{JT}} \sum_{i=1}^{n_G} T_{Ji} f_i \quad (8)$$

式中:  $T_{JT} = \sum_{i=1}^{n_G} T_{Ji}$ ;  $T_{Ji}$  为第  $i$  台机组惯性时间常数;  $n_G$  为机组台数;  $f_i$  为利用 WAMS 量测的第  $i$  台机组出口母线电压的频率。

考虑到在实际系统中, 扰动后瞬时的节点电压会出现突变, 电压突变在扰动初期(1~2 s 内)将对负荷有功变化产生主导性影响, 之后再由频率来起主导作用。因此, 虽然 WAMS 采集的实时频率数据精确度高, 由于尚未计及负载对电压突变瞬时的反应, 所以传统计算式并不能精确反映功率缺额程度。

典型负荷模型计及电压影响后<sup>[6]</sup>如式(9)所述。

$$P_{L,u} = \sum_{j=1}^M P_{L0,j} \left( \frac{U_j}{U_{0,j}} \right)^\beta \quad (9)$$

式中:  $P_{L,u}$  为系统负荷;  $M$  为负荷节点数;  $P_{L0,j}$  为第  $j$  个负荷节点扰动前有功;  $U_{0,j}$  为第  $j$  个负荷节点扰动前节点电压;  $U_j$  为第  $j$  个负荷节点扰动后瞬时节点电压;  $\beta$  为电压影响因子, 本文取  $\beta=1$ 。

因此本文通过考虑节点电压突变影响对功率缺额计算式做出修正来提高计算精度:

$$P_{shed} = T_{JT} \cdot \frac{df_{COL}}{dt} + \sum_{j=1}^M P_{L0,j} \left[ \left( \frac{U_j}{U_{0,j}} \right)^\beta - 1 \right] \quad (10)$$

### 3.2 计及动态修正的自适应低频减载策略

目前, 自适应低频减载策略的制定是基于频率变化率的, 而且将系统频率的下降变化简化为减载前是  $df/dt = K$ 、减载后  $df/dt$  是趋于 0 的线性变化过程。但系统频率下降实际上是一个非线性过程, 随着频率下降而不断减小。因此, 基于频率线性变化过程的自适应低频减载策略不能最大限度地减少减载负荷损失, 而且会提高频率超调概率, 造成负荷过切。

在每轮减载动作后, 由于系统自身频率调节特性的影响, 其频率变化率是动态变化的, 代表功率缺额也发生变化。未实行任何减载动作时的频率变化率最大, 每轮次减载动作后, 系统频率得到一定缓和, 对应的功率缺额将减少, 所需减载量也相应变少。以往的自适应控制未考虑减载量修正问题, 其减载的每轮次仍然依照初始时刻计算得到的最大不平衡功率来实行减载, 这将导致事故过切概率的增加。

由文献[19]可知, 为有效延缓频率下降, 减载首轮频率启动阈值宜选择高些, 同时考虑到启用旋转备用容量的延迟和避免因临时性频率降低所导致的不必要动作, 故首轮频率启动阈值整定在 49~49.5 Hz。本文仿真算例模型多为汽轮机组, 其调速系统动作快, 因此, 首轮频率启动阈值取为高值。

根据实际电网减载方式, 设置 4 级基本轮动作频率阈值为: 49.5 Hz、49.2 Hz、49.0 Hz、48.8 Hz; 后备轮的动作返回频率为 49.6 Hz。将每轮次原始减

载量  $P_{shed,j}$  依次设为功率缺额的 15%、15%、20%、20%, 后备轮减载量设为功率缺额的 30%。

由于不平衡功率同频率变化率呈近似线性关系, 故利用 WAMS 量测计算的相邻轮次频率动作阈值处的频率变化率  $df_{COL}/dt$  绝对值差, 同扰动瞬时的频率变化率  $df_{COL,max}/dt$  做比较, 便得到其变化梯度为

$$\Delta_j \% = \frac{df_{COL,j-1}/dt - df_{COL,j}/dt}{df_{COL,max}/dt} \times 100\% \quad (11)$$

变化梯度表征了功率缺额在每轮减载后的变化, 因此依据  $\Delta_j \%$  对减载量做出动态修正, 在实施第  $j$  轮次减载动作之前计算此时刻  $\Delta_j \%$ , 修正式为

$$P'_{shed,j} = P_{shed,j} (1 - \Delta_j \%) \quad (12)$$

得到修正减载量后, 利用式(7)来选址定容以满足频率稳定恢复的快速性要求和提高稳态频率水平。

## 4 算例仿真

### 4.1 算例系统

为验证所提减载策略优化方案的有效性, 采用 IEEE39 节点系统来进行仿真分析, 发电机组、变压器和线路主要参数参见文献[20]。仿真系统中 38 机为水电机组, 其余机组为火电机组, 35 机模拟联络线输送功率, 系统额定有功为 6 192.8 MW, 旋转备用容量为 764 MW, 系统无功储备充足。发电机采用 6 绕组模型, 励磁系统采用 IEEE 的 F 型模型, 负荷采用考虑频率调节效应的静态模型, 为 50%恒功率分量、40%恒阻抗分量和 10%的恒电流分量。仿真中认为节点重要度一致, 且认为供电负荷均为第三类负荷。计算出仿真系统的  $F_i$  如表 1 所述, 表中的  $K_L$  取正态分布随机数。

表 1 减载贡献因子  $F_i$  的计算

Table 1 Calculation of load-shedding contribution factor

母线	dv/dp	$K_L$	$F_i$	母线	dv/dp	$K_L$	$F_i$
21	15.191	7.768	11.480	26	3.802	5.628	5.167
23	14.991	5.445	10.218	12	3.308	8.409	5.151
24	10.559	8.170	8.809	7	2.836	6.488	4.898
16	9.450	7.868	8.131	8	2.810	3.914	4.771
15	8.396	3.151	6.855	25	2.436	4.655	4.228
18	6.511	8.166	5.501	28	1.956	4.632	3.534
27	5.629	6.315	5.255	20	1.893	4.180	3.068
3	4.707	3.969	5.240	29	1.328	3.615	2.471
4	4.195	7.621	5.216				

### 4.2 权重系数选择的讨论

减载贡献因子的权重系数选择主要依据减载配

置区域的负荷类型来确定, 如果减载配置区域的负荷频率调节能力较强, 即其  $K_L$  值较大, 则所选择的  $C_2$  指标的权重系数应更大些; 同样地, 如果减载配置区域的主要负荷为恒功率负荷, 由于负荷模型对系统电压稳定性有着很大影响, 而恒功率负荷模型的电压稳定问题更为突出, 因此往往在恒功率负荷占比较大的系统区域中, 减载中所参考的灵敏度指标  $dv/dp$  影响及贡献程度更大, 故而所选  $C_1$  指标的权重系数应当较大。本文在仿真过程所选用的负荷模型为 50%恒功率分量、40%恒阻抗分量和 10%的恒电流分量, 并考虑负荷频率调节效应,  $K_L$  值的选择满足常见取值范围内的正态分布。因此, 本文所确定的权重系数  $C_1=C_2=0.5$ , 即认为两个贡献指标的权重相同。

### 4.3 减载方案优化效果对比

在 4 s 时刻, 同时切除 31、35 和 38 机组, 此时系统存在大量不平衡功率, 频率迅速下降, 需采取低频减载来维持故障系统的频率稳定。

由 WAMS 所提供的切机后系统频率变化情况如图 3 所示, 因为 PMU 采样时间很短, 我们可以利用数值计算方法来近似获取频率变化率值:

$$df_{\text{COI}}/dt \approx \frac{1}{3} \cdot \frac{(f_{n+3} - f_{n+2}) + (f_{n+2} - f_{n+1}) + (f_{n+1} - f_n)}{\Delta t} \quad (13)$$

式中,  $\Delta t$  为 WAMS 装置的采样周期。

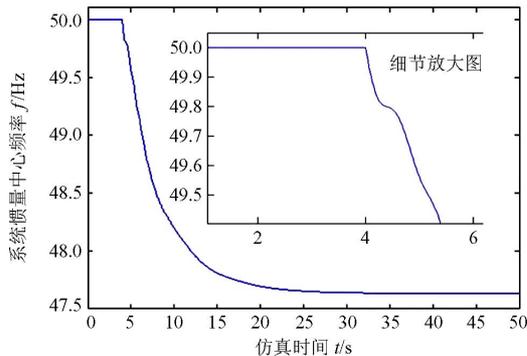


图 3 切机动作瞬间的系统频率变化

Fig. 3 System frequency variation at generator-tripping moment

图 4 描述扰动后 BUS-1 节点电压变化情况。观察图 3 和图 4 可知, 扰动后频率下降瞬间, 负荷节点电压也大幅下降, 且电压降低更为显著, 此后因励磁调节作用使电压逐渐恢复, 但频率仍继续降低。传统功率缺额计算值为 18.735 4 p.u., 而计及电压突变影响的式(10)所得功率缺额计算值为 20.605 p.u., 更为接近实际切机功率 20.528 p.u.。因此, 在功率缺额计算中考虑电压突变因素的影响可有效提高计算精度, 对比实际切机量, 本文计算值能够满足工

程应用上的精度要求, 具有一定可行性。

扰动后瞬间的系统惯量中心频率的变化率最大, 计算得到:  $df_{\text{COI,max}}/dt = -1.0767 \text{ Hz/s}$ 。当频率达到首轮动作阈值 49.5 Hz 时, 测量计算此刻的频率变化率  $df_{\text{COI,1}}/dt = -0.5245 \text{ Hz/s}$ 。由式(11)得  $\Delta_k = 51.286\%$ , 据式(12)修正首轮减载量, 实际应切除  $P'_{\text{shed,1}} = 7.31\%$ 。同样地, 在实施每轮减载措施之前, 逐轮求出相邻两轮的频率变化率及变化梯度, 各轮数据如表 2 所述。

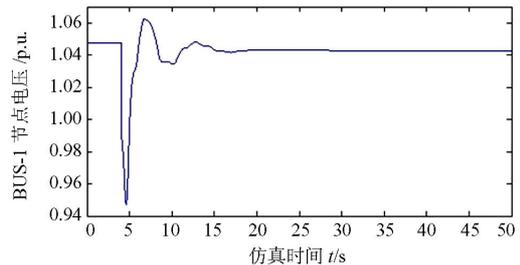


图 4 系统遭受扰动后负荷节点电压曲线

Fig. 4 Load node voltage curve of the disturbed system

表 2 各轮频率变化率与  $\Delta_k$ %

Table 2 Frequency change rate of each steps and its gradient

减载轮次	频率变化率 $df_{\text{COI}}/dt$	$\Delta_k$ %
第一轮	-0.524 5	51.286
第二轮	-0.360 9	15.195
第三轮	-0.326 5	3.195
第四轮	-0.003 3	30.018
后备轮	-0.013 1	1.523

本文所提动态修正的自适应减载优化方案与传统减载方案的各轮次减载量对比数据如表 3 所述。

表 3 进行动态修正的效果对比

Table 3 Comparison of dynamic correction effect

减载轮次	减载过程切负荷量	
	传统方案	本文优化方案
第一轮	15%	7.31%
第二轮	15%	12.72%
第三轮	20%	19.36%
第四轮	20%	14.00%
后备轮	30%	29.54%
总计	100%	82.93%

由表 3 可知, 对比动态优化方案 and 传统方案, 前者削减的减载量共计 17.07%, 相当于减少 351.73 MW 的负荷有功切除量, 证明了本文所提动态修正策略能充分发挥系统的频率自调节能力, 从而大幅度减少减载量, 降低事故控制代价。

为验证所提动态修正自适应减载方案的有效性, 将表 3 中的两类方案进行仿真对比。方案 1 为

动态修正优化方案, 并根据减载贡献因子来确定选址定容; 方案 2 为传统方案, 仅根据节点负荷比例来分配减载。两方案减载后的频率稳定恢复曲线如图 5 所示。

一般而言, UFLS 问题可描述为通过适当的优化, 在满足安稳约束条件下使得故障场景中的负荷损失最少, 即控制代价最低<sup>[8]</sup>。安稳运行时的系统频率偏差限值要求  $\pm 0.2$  Hz, 小容量系统则允许  $\pm 0.5$  Hz 的偏差限值; 在频率恢复过程中尽量避免超调, 以免引起负荷过切; 为保证火电厂等的安稳运行, 频率低于 47.5 Hz 的时间不能超过 0.5 s<sup>[1]</sup>。

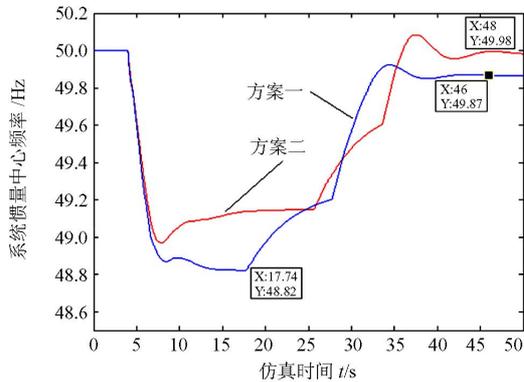


图 5 频率稳定恢复曲线对比

Fig. 5 Comparison of frequency stability recovery curve

由图 5 可看出方案 1 能更快地恢复频率稳定, 其稳定恢复时间分别为 40.2 s 和 44.5 s; 在 36.1~39.98 s 内, 方案 2 的频率超调, 说明其的确造成了不必要的负荷过切; 在故障前期, 尽管方案 1 的暂态频率要明显低于方案 2, 但其暂态最低频率为 48.82 Hz, 高于规定的 47.5 Hz。通过各轮减载动作后, 两方案的系统稳态频率分别为 49.87 Hz 和 49.98 Hz, 其稳态频率差的标幺值仅为 0.22%, 可在事故后期利用系统其他的频率稳控措施来使频率恢复至 50 Hz, 从而降低紧急控制中的事故控制代价。

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协调统一, 因此综合评价减载策略的优劣性不仅要体现在系统稳态频率上, 同时还需关注减载量的多少和频率稳定恢复效果。减载量方面, 方案 1 远小于方案 2, 明显避免因负荷过切而引起的频率超调。利用减载贡献因子的选址定容能有效改善频率稳定恢复效果, 满足保护动作的快速性要求。由于两方案的频率恢复过程均能满足低频减载的各项安稳约束, 综合对比可知, 方案 1 的实施更能兼顾经济性与供电可靠性要求, 可以最小控制代价使系统频率更好地恢复稳定。

## 5 结论

新形势下的低频减载策略制定要求兼顾频率稳定恢复过程中的经济性与供电可靠性两方面性能的综合提升, 本文提出一种基于 WAMS 的自适应减载策略动态修正优化方法以应对新要求。

该方法通过将广域量测数据同减载过程相结合来缩短控制时延, 考虑到电压突变因素对功率缺额的影响以校正提高其计算精度。计及系统频率自恢复调节能力, 利用频率变化率的梯度变化动态修正各轮次减载量, 来提高紧急减载控制的经济性。在考虑选址定容时分析了频率恢复过程中的频率暂态过程和与系统切负荷量紧密相关的因素, 来构建减载贡献因子。

由仿真结果分析可知, 本文所提的利用广域量测数据的改进功率缺额计算式精度得到了明显提高, 但是仍和实际切机量有略微差别。这是由系统惯性时间常数  $T_{JT}$  在进行切机操作后会有一定改变和电压影响因子  $\beta$  的选择问题所导致的误差, 但其尚能达到工程精度要求。在满足频率稳态及超调约束下, 自适应减载动态修正优化策略不仅可大幅度降低事故减载量, 避免负荷过切。还能改善提升频率稳定恢复效果, 能为实际的在线频率控制应用提供新的思路与参考。必须指出, 本文还有许多工作尚未深入考虑, 如计及 599 号减载惩罚代价后的分散协调减载和加强预防控制的风险评估等, 仍有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院. 电力安全事故应急处置和调查处理条例[EB/OL]. [2011-07-15]. [http://www.gov.cn/zw/gk/2011-07/15/content\\_1906887.html](http://www.gov.cn/zw/gk/2011-07/15/content_1906887.html).
- [2] 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[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 100-107.  
XUE Yusheng, REN Xiancheng, WU Q H, et al. A review on optimization and coordination of under frequency/voltage load shedding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 100-107.
- [3] 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 characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 48-51.
- [4] 郭晓冬. 基于广域测量(WAMS)的低频减载研究[D].

- 武汉: 华中科技大学, 2006.
- GUO Xiaodong. WAMS-based under-frequency load shedding research[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2006.
- [5] 侯王宾, 刘天琪, 李兴源. 基于综合权值和广域测量的低频减载[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 70-75.
- HOU Wangbin, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Under frequency load shedding based on comprehensive weight and wide area measurement system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 70-75.
- [6] RUDEZ U, MIHALIC R. Monitoring the first frequency derivative to improve adaptive under-frequency load-shedding schemes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 839-846.
- [7] 樊艳芳, 钟显, 常喜强, 等. 频率的时空分布对低频减载的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 55-60.
- FAN Yanfang, ZHONG Xian, CHANG Xiqiang, et al. Research of the UFLS under the frequency characteristics of temporal and spatial distribution[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 55-60.
- [8] 汪震, 宋晓喆, 甘德强, 等. 考虑系统频率恢复性能的低频减载参数优化模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 17-22.
- WANG Zhen, SONG Xiaozhe, GAN Deqiang, et al. A parameter optimization model of under-frequency load shedding considering frequency recovery performance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 17-22.
- [9] 李琳, 罗剑波, 周霞, 等. 基于风险管理的过载切负荷策略制定[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 821-826.
- LI Lin, LUO Jianbo, ZHOU Xia, et al. Risk management-based drafting of overload load shedding strategy[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 821-826.
- [10] 张保会, 康小宁, 袁越, 等. 关于电力系统安全稳定控制装置(系统)基本要求的再探讨[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(9): 60-64.
- ZHANG Baohui, KANG Xiaoning, YUAN Yue, et al. A proposal concerning the fundamental criteria of control equipment for power system stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(9): 60-64.
- [11] 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[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 57-61.
- YU Zhiwen, BAI Xuefeng, GUO Zhizhong, et al. Probe on the transient stability control method for heavily stressed transmission network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 57-61.
- [12] 柏丹丹, 和敬涵, 王小君, 等. 基于灰色关联分析的自适应低频减载[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 20-25.
- BAI Dandan, HE Jinghan, WANG Xiaojun, et al. Adaptive UFLS scheme based on grey correlation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 20-25.
- [13] DL755-2001 电力系统安全稳定导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [14] 于达仁, 郭钰锋. 电网一次调频能力的在线估计[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 72-76.
- YU Daren, GUO Yufeng. The online estimate of primary frequency control ability in electric power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 72-76.
- [15] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [16] 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 dynamic interaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 24-28.
- [17] 黄镔, 赵良, 马世英, 等. 基于 PV 曲线的低压减载配置方法[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 26-34.
- HUANG Bin, ZHAO Liang, MA Shiyong, et al. Under voltage load shedding configuration based on PV curve[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 26-34.
- [18] 袁季修. 防御大停电的广域保护和紧急控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 141-175.
- [19] 杨冠城. 电力系统自动装置原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [20] ANDERSON P M, FOUAD A A. Power system control and stability[M]. Piscataway: IEEE Press Wiley-Interscience, 2003: 53-80.

收稿日期: 2015-07-30; 修回日期: 2015-10-20

作者简介:

李 顺(1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向电力系统运行与控制; E-mail: piaocool007@163.com

廖清芬(1975-), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 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, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制、电力系统规划。E-mail: dcliu@whu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)