

[电网负荷]

一种考虑负荷特性的集中式自适应低频减载方案

文/福建华电万安能源有限公司 温兴禄 陈振安 卢恒光
福州大学电气工程与自动化学院 吴嘉华

首先分析了负荷特性对功率缺额计算的影响，推导出基于频率变化率响应和负荷特性的电网有功缺额计算新方法；其次研究了负荷特性的变化对传统逐轮次低频减载方案的影响，在负荷特性发生改变时，其无法达到预期的减载效果；最后提出了一种考虑负荷特性的集中式自适应低频减载方案。

频率稳定本质上是由系统发电机发出的有功功率和负荷吸收的有功功率之间的平衡关系决定的。当平衡关系被打破时，会导致频率的上升或者下降。相比于频率上升，频率下降对系统会产生更大的危害。当系统无法依靠自身使频率恢复时，需要依靠低频减载方法。由于无法预知扰动导致的系统有功缺额数值，传统逐轮次低频减载试图以多级、固定的减负荷量去逼近随机发生、连续分布的系统实际有功缺额，在严重扰动下易出现欠控制或者过控制的风险。半自适应型低频减载虽在此基础上进行了改良，通过引入加速轮改善了系统严重有功缺额时的频率恢复动态性能，但由于其结构和设计原理都与逐轮次低频减载相似，虽然可以减少但不能避免欠切或者过切的风险。由于实际运行工况的复杂多变以及扰动场景的无法穷尽，上述两类方案在实际场景的适用性均受到限制，由此衍生出了自适应型的低频减载。

现有文献大多在推算系统初始有功缺额时仅利用了扰动后的发电机转子运动方程，而没有考虑系统扰动瞬间负荷电压突变可能带来的影响，使得推算得到的有功缺额数值与系统实际初始有功缺额存在差异；虽然有文献考虑到电压突变的影响并将其附加到功率缺额的计算中，但是缺乏

详细的理论推导，同时未考虑负荷特性对低频减载的影响以及对所提方案自适应性的验证。

因此，本文提出了一种考虑负荷特性的集中式自适应低频减载方案。在计算出系统实时的功率缺额后，将减载量合理地分配在各个轮次，充分发挥自适应低频减载方案的优势。通过在IEEE 39节点系统中孤岛系统的仿真，表明本文所提方案的优越性和多场景下的适应性。

有功缺额计算新方法

1. 现有有功缺额计算方法

忽略发电机的机械和电气阻尼，第*i*台发电机的转子运动方程为

$$M_{j,i} \frac{d\omega_i}{dt} = p_{m,i} - p_{e,i} = p_{imb} \quad (1)$$

式中， $M_{j,i}$ 、 $p_{e,i}$ 、 p_{imb} 、 $p_{m,i}$ 和 ω_i 分别是第*i*台发电机的转动惯量、电磁功率、不平衡功率、机械功率和转子角速度。

在标幺值下，有 $\omega_i = f_i$ ，系统的不平衡功率可以表示为

$$M_{eq} \frac{df_{col}}{dt} = \sum_{i=1}^N p_{m,i} - \sum_{i=1}^N p_{e,i} = -\Delta p \quad (2)$$

$$M_{eq} = \sum_{i=1}^N M_{j,i}, f_{col} = \frac{\sum_{i=1}^N M_{j,i} f_i}{\sum_{i=1}^N M_{j,i}} \quad (3)$$

式中, N 是发电机的总数; M_{eq} 和 ΔP 和 f_{COI} 分别是系统等值惯量、不平衡功率和惯量中心频率。其中, 式(2)为现有有功缺额计算方法。

2. 负荷特性对有功缺额计算的影响

设 $t=t_0$ 时刻系统遭受扰动, 定义 t_0^- 为扰动发生前的瞬间时刻, t_0^+ 为扰动发生后的瞬间时刻, 对应某一具体时刻 $t=T(T>t_0)$ 。

假设负荷为静态负荷, 仅考虑负荷的电压特性有

$$P_{L,t=T} = P_{L,t=t_0^-} \left[a_p \left(\frac{V_{L,t=T}}{V_{L,t=t_0^-}} \right)^2 + b_p \left(\frac{V_{L,t=T}}{V_{L,t=t_0^-}} \right) + c_p \right] \quad (4)$$

式中, a_p , b_p , c_p 分别是负荷中恒阻抗、恒电流和恒功率成分比例; $V_{L,t=T}$, $V_{L,t=t_0^-}$ 分别是相应下标时刻负荷电压; $P_{L,t=T}$, $P_{L,t=t_0^-}$ 分别是相应下标时刻负荷有功; 式中的各项系数应该满足 $a_p + b_p + c_p = 1$, $a_p + b_p + c_p \geq 0$ 。

扰动后 $t=T$ 时刻与扰动前 $t=t_0$ 时刻的负荷有功差值 $\varepsilon_{t=T}$ 可以表示为

$$\begin{aligned} \varepsilon_{t=T} &= P_{L,t=t_0^-} - P_{L,t=T} \\ &= P_{L,t=t_0^-} \left[\left(a_p \frac{V_{L,t=t_0^-}^2 - V_{L,t=T}^2}{V_{L,t=t_0^-}^2} + b_p \frac{V_{L,t=t_0^-} - V_{L,t=T}}{V_{L,t=t_0^-}} \right) \right] \quad (5) \end{aligned}$$

当系统发生严重故障后, 往往伴随着系统电压的跌落, 使 $V_{L,t=T} < V_{L,t=t_0^-}$, 由式(5)可知 $\varepsilon_{t=T} > 0$, 再由式(2), 有

$$0 < \Delta P_{t=T} < \Delta P_{def} \quad (6)$$

式(6)说明, 忽略电压偏移使得根据式(2)计算得到的不平衡功率 $\Delta P_{t=T}$ 小于实际功率缺额 ΔP_{def} , 以式(2)计算的结果作为减载量得到的减载方案有造成欠控制的风险。

因此, 基于式(2)计算得到的系统不平衡功率需要再考虑电压偏移造成的有功缺额影响 $\varepsilon_{t=T}$ 。

3. 基于频率变化率响应和负荷特性的新计算方法

本文是根据扰动发生期间, 在系统频率降低至低频减载装置首轮动作时刻 $t_{shed,1}$, 在该时刻切除一定比例的负荷, 取 $t_{shed,1}$ 前后两个较短时刻 t_1 、 t_2 , 得到两个时刻的负荷有功和频率变化率, 利用差值去估算系统实际的惯量, 进而计算出系统不平衡功率, 然后再补偿上电压偏移造成的有功缺额影响, 得到系统实际功率缺额。

对应某两个时刻 t_1 和 t_2 , 式(2)有

$$M_{eq} \frac{df_{COI}}{dt} = -\Delta P_{t=t_1} \quad (7)$$

$$M_{eq} \frac{df_{COI}}{dt} = -\Delta P_{t=t_2} \quad (8)$$

式中, t_1 、 t_2 分别是 $t_{shed,1}$ 前后两个较短时刻, 间隔约为几百毫秒; $\frac{df_{COI}}{dt}$ 、 $\frac{df_{COI}}{dt}$ 分别是 t_1 和 t_2 时刻的系统惯量中心频率变化率; $\Delta P_{t=t_1}$ 、 $\Delta P_{t=t_2}$ 分别是 t_1 和 t_2 时刻的系统不平衡功率。

系统的不平衡功率主要由负荷有功、线路损耗和机械有功三部分构成, 由式(4)有

$$\begin{aligned} P_{L,t=t_1} &= P_{L,t=t_0^-} \left[a_p \left(\frac{V_{L,t=t_1}}{V_{L,t=t_0^-}} \right)^2 + b_p \left(\frac{V_{L,t=t_1}}{V_{L,t=t_0^-}} \right) + c_p \right] + \\ &P_{Loss,t=t_1} - P_{m,t=t_1} \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{L,t=t_2} &= P_{L,t=t_0^-} \left[a_p \left(\frac{V_{L,t=t_2}}{V_{L,t=t_0^-}} \right)^2 + b_p \left(\frac{V_{L,t=t_2}}{V_{L,t=t_0^-}} \right) + c_p \right] + \\ &P_{Loss,t=t_2} - P_{m,t=t_2} \quad (10) \end{aligned}$$

式中, $P_{m,t=t_1}$ 、 $P_{Loss,t=t_1}$ 分别是 t_1 时刻系统机械有功、损耗; $P_{m,t=t_2}$ 、 $P_{Loss,t=t_2}$ 分别是 t_2 时刻系统机械有功和损耗。

式(9)与式(10)相减, 同时联立式(7)和式(8)并忽略机械有功和损耗的变化量, 可以得到 M_{eq} , 再根据系统当前时刻的频率变化率以及电压偏移带来的影响, 即可获得 $t=T$ 时刻系统功率缺额 ΔP_{total} 。

新方法计算结果相当于在现有方法结果基础上补偿上电压偏移项, 计算时不需要知道 M_{eq} , 因此克服了式(2)计算时忽略负荷特性导致有功缺额数值较小和需要获取实时惯量的问题。

传统逐轮次低频减载方案

在算例一的基础上, 减载方案采用某传统逐轮次b方案, 通过模拟接入不同的负荷特性, 分析负荷特性对孤岛的负荷电压特性和负荷有功的影响。其中, 负荷模型见表1, 各减载轮次相应动作时间见表2。

表1 负荷模型

模型	负荷参数		
	a_p	b_p	c_p
一	0.7	0.3	0.0
二	0.6	0.3	0.1
三	0.5	0.3	0.2
四	0.4	0.3	0.3

表2 动作时间

轮数	I	II	III	IV	V
起动时间/s	1.70	2.58	*	11.10	15.99
切负荷量(%)	12	8	*	5	3

在负荷恒电流成分比例大小不变的情况下,减小负荷恒阻抗成分比例大小。如图1和图2所示,分别为不同负荷模型下节点16的负荷电压和负荷有功功率。

由式(4)可知,扰动发生后,系统频率开始下降,电压迅速跌落。当系统频率下降到低频减载装置动作时刻,低频减载装置动作,负荷被切除,此时频率和电压开始恢复,电压通过负荷静态特性,使电网中剩余负荷吸收的功率增加,从而在一定程度上制约低频减载的减载效果。

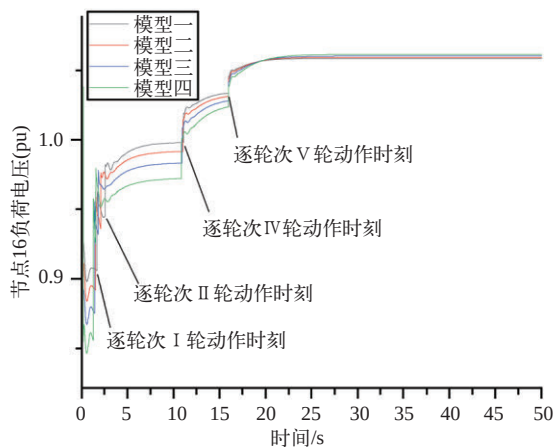


图1 不同负荷模型下节点16的负荷电压

由图1可以看出,当扰动开始时,由于系统功率缺额较大,电压开始跌落,一段时间后由于调速器、调压器的作用,电压短暂恢复后又开始下降。随后,逐轮次I轮、逐轮次II轮动作,切除一定负荷,迅速抑制电压跌落,同时电压快速恢复,但由于功率缺额仍然较大,电压在上升到一定值后继续下降;紧接着逐轮次IV轮动作,此时功率缺额进一步缩小,电压开始恢复;逐轮次V轮动作后,电压继续升高,此时功率缺额已经较小,电压逐渐稳定在某一值。

由图2可以看出,恒阻抗成分比例越大,负荷吸收的功率下降得越大。由式(4)可知,不同的负荷参数与负荷电压会影响负荷吸收的有功功率。因此对于不同的静态负荷模型来说,在相同扰动下,同一节点吸收的负荷有功由于电压变化幅度的不同而各不相同,在减载时需要充分考虑这一点。

系统在严重扰动下电压将迅速跌落,对负荷

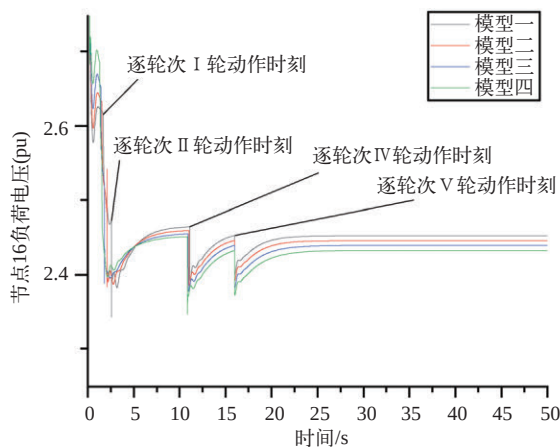


图2 不同负荷模型下节点16的负荷有功功率

吸收的有功产生影响,而传统逐轮次低频减载方案采用的是分级、固定的减载策略。因此,传统逐轮次低频减载方案不能有效地适应负荷特性的变化,实现预期的减载效果。

集中式自适应低频减载方案

本方案包括一个启动轮、两个追加轮和一个特殊轮。首先,启动轮仿照传统逐轮次方案的思想切除固定比例的负荷 $\Delta P_{shed,1}$;其次,在启动轮切除一定比例负荷的基础上,计算出系统有功缺额 ΔP_{total} 以及剩余有功缺额 ΔP_{res} ;然后,在追加一轮中切除大部分负荷,迅速抑制频率下降;再者,如果频率继续下降,在追加二轮中切除剩余的一小部分负荷,使频率恢复稳定;最后,保留特殊轮,防止由于其他未考虑因素导致的频率悬停。为减小切负荷损失,需要充分发挥旋转备用和负荷特性对频率恢复的作用,因此实际总减载量尽量小于 ΔP_{total} 。

集中式自适应低频减载方案的具体参数设置如下。

启动轮: $f_1 = 49 \text{ Hz}$, $t_{delay,1} = 0.2 \text{ s}$, $\Delta P_{shed,1} \% = 5\%$;

追加一轮: $f_2 = 48.8 \text{ Hz}$, $t_{delay,2} = 0.2 \text{ s}$, $\Delta P_{shed,2} \% = \alpha \Delta P_{res}$, $0.75 < \alpha < 0.85$;

追加二轮: $f_3 = 48.4 \text{ Hz}$, $t_{delay,3} = 0.2 \text{ s}$, $\Delta P_{shed,3} \% = \beta \Delta P_{res}$, $0.05 < \beta < 0.15$;

特殊轮: $f_4 = 49 \text{ Hz}$, $t_{delay,4} = 10 \text{ s}$, $\Delta P_{shed,4} \% = 5\%$ 。

仿真

1. 减载方案的优越性

算例一:为验证所提方案的减载效果,采用

PSASP软件进行仿真,仿真模型如图3所示。设定扰动为0.2 s时刻G5、G6机组脱落,同时15-16、16-17线路断线,即在图3中右下角建立孤岛,以此孤岛作为控制对象。其中,负荷有功为17.878(pu),发电机有功为11.920(pu),考虑带调压器、调速器的作用。

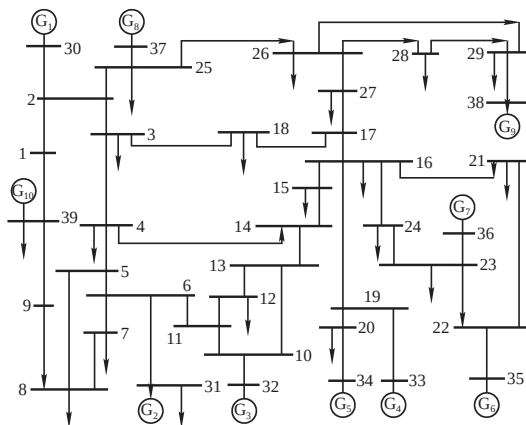


图3 IEEE39节点系统接线图

选取某传统逐轮次a方案、某传统逐轮次b方案、某传统逐轮次c方案、某传统逐轮次d方案与本文所提方案进行效果对比。以计算出的有功缺额作为总的切负荷量,采用本文所提方案,与传统低频减载方案的对比效果以及各方案总切负荷比例分别如图4、表3所示。

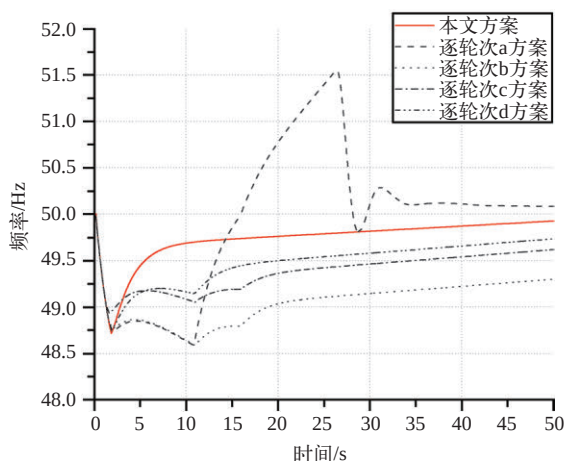


图4 算例一不同减载方案的对比

表3 各减载方案总切负荷比例

系统实际有功缺额	本文方案	逐轮次a方案	逐轮次b方案	逐轮次c方案	逐轮次d方案
33.31%	27.76%	38%	28.00%	28.00%	28.00%

由图4和表3可知,算例一场景下五种减载方案中,本文所提方案减载量最低为27.76%,

暂态过程无超调,稳态频率合格为(50 s时)49.93 Hz,频率恢复效果明显好于逐轮次b、c、d方案;逐轮次b、c、d方案减载量为28%次低,比自适应减载方案多0.24%,但是稳态频率分别为49.30 Hz、49.62 Hz和49.74 Hz,分别比自适应方案低0.63 Hz、0.31 Hz和0.19 Hz;逐轮次a方案减载量比自适应方案多切除10.24%负荷,但最低频率仍然比自适应方案低0.13 Hz,且暂态过程产生了超调,最高频率为51.55 Hz(超过51.5 Hz);五种减载方案中,本文所提方案在10 s左右便使频率恢复至一个比较稳定的水平,减载后频率恢复速度更快。

综合看来,在其他方案频率失稳时,本文所提方案可以有效保证系统频率稳定;在减载量相近时,本文所提方案的稳态频率更接近50 Hz,减载后频率恢复更快;本文所提方案可以用较小甚至最小的减负荷量得到最优的频率恢复效果。

2. 减载方案的适应性

算例二:为验证所提方案的适应性,采用PSASP仿真软件,在如图1所示IEEE 39节点系统中仿真了本文方案在不同运行方式、不同负荷模型下的减载效果。仿真中负荷模型采用静态负荷模型,考虑调速器和调压器。设定扰动为0.2 s时刻G3、G4机组脱落,同时25-26、17-18、4-14和6-11线路断线,即在图3中右半部分建立孤岛。设置两种不同的负荷模型,如表4所示,分别在两种负荷模型下,改变发电机G6的出力,从450~650 MW,每次增加25 MW的出力。其中,负荷有功为30.24(pu),发电机有功为25.48(pu)、惯量为243.4 s。

表4 负荷模型

模型	负荷参数		
	a_p	b_p	c_p
一	0.6	0.2	0.2
二	0.7	0.3	0

基于模型一的不同运行方式下的减载效果可以看出:当系统运行方式发生改变时,虽然不同运行方式下的频率恢复特性各不相同,但是暂态过程无超调,均在短时间内抑制频率的下降,使频率快速恢复稳定。

在负荷模型一下实施集中式自适应低频减载措施后,系统在不同运行方式下的最高频率和最低频率如图5所示。其中横坐标是系统有功缺额比例,变化范围从15.75%~22.37%;纵坐标是频率,表示当前有功缺额条件下实施自适应减载

(下转第41页)

效的全局自适应搜索方法。基于自然选择和遗传理论，可以对搜索过程进行自适应控制，得到最优解。遗传算法步骤如下。

1) 基因编码：本文选取浮点数编码进行编码，将线路的过负荷值进行基因编码。

2) 群体初始化：随机产生 m 条染色体形成群体，每个初始个体代表问题的初始解。

3) 个体适应度计算：在遗传算法优化过程中，合适的适应度函数可以指导优化的方向。取适应度函数为 $Fitness = n'/n$ ，其中： n' 表示正确分类的训练实例数； n 表示训练实例总数。

4) 优良个体选择：从种群中选出优良的个体为父代，适应性强的个体更有可能被选中，淘汰适应度低的个体。

5) 交叉：交叉是产生新个体的主要途径之一，本文选择分散交叉法。

6) 变异：变异是模拟生物进化中的基因突变，可以加速收敛到最优解。

结束语

针对配电网过负荷优化方面，根据线路运行的容量约束、负荷平衡约束和拓扑约束，基于遗传算法的自适应权值可以实现抑制冗余，结合配电网过负荷优化的约束条件，发现以最小过载系数为目标的配电网优化方法可以较好地实现对配电网的负荷优化控制。EA

(收稿日期：2019.12.16)

(编辑：朱金凤)

(上接第31页)

方案后，系统的最高频率和最低频率。最高频率的变化范围从49.68~49.85 Hz，均维持在49.7 Hz附近，稳态频率合格；最低频率的变化范围从48.75~48.79 Hz，均维持在48.8 Hz附近，这是由于自适应减载方案中追加二轮对于频率门槛值的设定为一固定值48.8 Hz，启动延时为0.2 s。

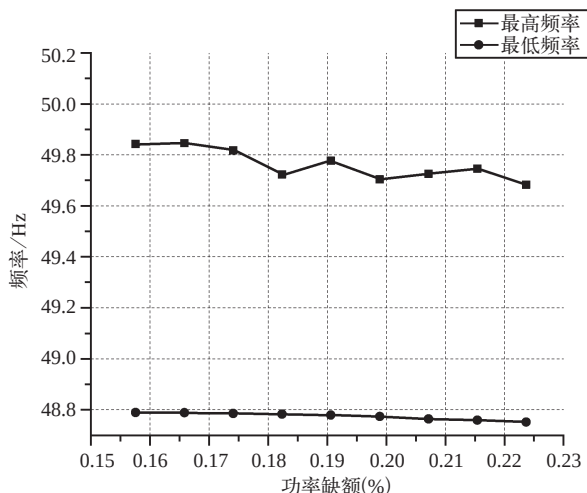


图5 基于模型一不同运行方式下的最高频率和最低频率

基于模型二不同运行方式下的减载效果可知，该场景下虽然在某些运行方式下频率恢复时

间较慢，但总体上均能够使频率快速恢复稳定。

基于模型二不同运行方式下最高频率为49.58~49.66 Hz，均维持在49.6 Hz附近，稳态频率合格（50 s）；最低频率为48.77~48.79 Hz，高于47.5 Hz，频率未失稳。

结束语

本文提出了一种考虑负荷特性的集中式自适应低频减载方案，该方案在分析负荷特性对负荷有功功率影响的基础上，根据在线测得的各发电机频率和本地负荷有功自动计算出系统实时的功率缺额，以该功率缺额作为减载量并合理地分配在多个轮次进行切除。仿真结果表明，与传统逐轮次低频减载方案相比，本文方案的切负荷量以及动态频率偏移相对更小，频率恢复稳定能力更强；改变系统运行方式、负荷类型，所提方案仍然能够使频率快速恢复稳定，能更好地适应负荷特性和系统运行方式的变化，有效保障受扰系统的频率稳定性，对集中式自适应低频减载方案的相关研究具有一定的借鉴意义。EA

(收稿日期：2020.01.05)

(编辑：朱金凤)