

计及动态修正的自适应广域低频减载

宋兆欧^{1,2}, 刘俊勇^{1,2}, 刘友波^{1,2}, MASOUD Bazargan³, LIANG Wuxing³

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065;
3. ALSTOM 电网研究技术中心, 斯塔福德郡 ST17 4LX)

摘要: 传统分轮逐次逼近的低频减载方法, 对系统运行变化缺乏足够的适应性, 会造成过切、欠切等问题, 所以提出一种基于广域测量系统计及动态修正的自适应低频减载策略。在低阶频率响应模型的基础上, 考虑电压对不平衡功率的影响, 利用较短周期内的系统响应轨迹估计系统不平衡功率; 考虑系统频率自恢复调节能力, 采用频率变化率变化梯度逐轮对减载量进行动态修正; 各负荷节点减载量由计及负荷特性、发电机受扰程度的多因素综合指标确定。IEEE 68 节点系统仿真结果表明, 所提方法可有效减少负荷切除量, 同时能明显缩短频率恢复时间, 保证了系统的稳定运行。

关键词: 广域测量系统; 低频减载; 不平衡功率; 负荷静特性; 发电机惯性

中图分类号: TM 76

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.04.017

0 引言

作为电力系统的第三道防线, 低频减载是恢复频率稳定的最重要手段之一^[1]。目前, 低频减载方法主要有传统低频减载与自适应低频减载 2 类。传统低频减载主要基于离线计算, 按照频率变化量分级延时减载, 每一级按照动作频率延时切除预先设定的负荷; 而自适应低频减载则是计算系统不平衡功率并将其分配到各轮次进行时延切负荷操作, 在切负荷判定中定量考虑在线工况。

文献[2]针对电力系统低频减载技术的特点、方案分类、应用现状、优化研究及各种先进算法在低频减载中的应用情况进行综合阐述, 简要探讨了各种方案的特点、不足及其改进, 此外还研究了元件参数模型的变化、动态变量间的相互作用对低频减载方案设计与实施所产生的影响以及协调控制技术的相关应用。文献[3]提出了基于风险控制和轨迹量化分析的低频减载和低压减载互相优化协调的防御措施, 并提出以安全裕度为标准, 对控制措施的性价比进行搜索和迭代优化。文献[4]基于非递归牛顿型算法估算频率和频率变化率, 提出了一种能够防止电力系统频率崩溃和动态失稳的低频减载方案。文

献[5]提出了一种针对微电网频率控制的新策略。该策略由 PID 控制器构成频率的闭环控制回路, 根据系统的功率缺额, 调整 PID 控制算法, 并分别采用粗调轮与细调轮低频减载、紧急启动轮低频减载等策略进行频率控制。文献[6]考虑了不同负荷节点频率特性差异, 提出了基于综合权值的减载方案, 但是减载方案为一次性切负荷, 切除负荷量较大, 对系统运行方式变化的适应性不足。文献[7-8]提出了一种低阶系统响应模型计算全网扰动功率的方法。文献[9]研究了同时保证频率稳定和电压稳定的切负荷总量与分配的方法。文献[6-9]的研究在计算系统不平衡功率时都采用低阶频率响应模型 LFRM (Low-order Frequency Response Model), 然而这个模型忽略了扰动初始时系统电压对不平衡功率的影响^[10], 导致功率缺额的估计不准确。

当系统发生有功功率缺额时, 系统的频率下降程度和下降速度主要取决于发电功率缺额、负荷频率特性、旋转备用容量和剩余发电机总转动惯量 4 个因素。上述文献大多数只关注了前三者的影响, 却极少关注发电机总转动惯量对电网动态频率的影响。多机系统在有功扰动下, 其频率变化与发电机惯性时间常数以及扰动地点有密切的关系, 因此发电机惯性对频率的影响不容忽略。

传统自适应低频减载切负荷是建立在频率变化率线性变化的基础上, 忽略了系统自身调节能力及负荷特性。但实际上不平衡功率处于一个动态变化状态, 为防止过切与欠切的发生, 对低频减载量的修正十分必要。此外, 多数低频减载方案在选址定容时忽略了负荷的差异性, 使得频率恢复速度差强人意。

基于广域测量系统(WAMS)的数据平台为频率采集和分析提供了强大的支持^[11]。综合自适应低频减载的研究成果与所存在的问题, 本文提出一种基

收稿日期: 2013-07-26; 修回日期: 2014-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50977059, 51207098); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011SCU11-063); 四川省科技厅产业发展重大关键技术项目(2011GZ-0225); 科技部中欧中小企业节能减排科研合作资金资助项目(SQ2011ZOF000004)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (50977059, 51207098), the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2011SCU11063), the Key Program of Sichuan Science & Technology Department(2011GZ-0225) and the Science Collaboration Foundation of Energy-saving Emission-reducing of Small Medium-sized Enterprises in Sino-European(SQ2011ZOF000004)

于 WAMS 的自适应广域低频减载的新方法。主要工作包括:基于 WAMS, 计算计及电压影响因子的不平衡功率; 兼顾负荷特性及发电机对负荷的影响, 构建综合减载量判据; 计及系统自身调节能力与系统频率变化率实时水平, 动态修正减载量; IEEE 68 节点系统仿真校验。

1 基于 WAMS 的不平衡功率计算

1.1 基于频率响应模型的不平衡功率计算

WAMS 克服了传统 SCADA/EMS 数据刷新周期长的缺陷, 能够提供 ms 级以上、带相同时标的系统运行状态测量值, 为现代电力系统频率紧急控制提供了新的技术平台^[12]。为了准确估算整个系统的不平衡功率, 采用惯性中心 (COI) 参数进行计算。定义系统惯性中心的转动惯量 H_{eq} 和频率 f_{COI} 分别为:

$$H_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^N H_i S_i}{\sum_{i=1}^N S_i} \quad (1)$$

$$f_{COI} = \frac{\sum_{i=1}^N H_i f_i}{\sum_{i=1}^N H_i} \quad (2)$$

其中, H_i 为第 i 台发电机的转动惯量; S_i 为第 i 台发电机的额定功率; N 为发电机总数; f_i 为第 i 台发电机的频率。系统惯性中心频率 f_{COI} 反映了电力系统这个整体在出现有功功率波动后, 由系统整体阻尼特性决定的转子减速或加速过程。

根据 WAMS 提供的系统频率变化曲线, 采用数值计算方法计算扰动初始时刻的频率变化率:

$$\frac{df_i}{dt} \approx \frac{df(n)}{dt} = \frac{[f(n) - f(n-1)]}{T_i} \quad (3)$$

其中, $f(n)$ 为第 n 个采样周期的采样频率; T_i 为时间间隔。

基于低阶频率响应模型计算系统不平衡功率^[6]:

$$P_{def} = \frac{2H_{eq}}{f_N} \frac{df_{COI}}{dt} S_{eq} \quad (4)$$

$$S_{eq} = \sum_{i=1}^N S_i \quad (5)$$

其中, f_N 为电力系统额定频率。

1.2 不平衡功率计算的电压影响因素

低阶频率响应模型认为各节点电压是恒定的, 忽略了扰动初始时刻系统电压对功率缺额的影响。然而, 在频率下降的过程中, 节点电压也同时下降, 这意味着有功功率缺额通常与无功功率缺额存在耦合联系^[13-15]。在扰动发生的 1~2 s 内, 电压变化对负荷有功功率变化起主导性作用, 在此之后频率影响代替电压起决定性作用。由于负荷的改变影响系统的有功缺额, 而在扰动的初始时刻, 系统电压会发生

突变, 由 WAMS 采集的实时频率数据虽然准确, 但仅依赖低阶频率响应模型, 并不能完全反映系统不平衡功率, 负荷对于电压变化的瞬时反应不可忽略。

考虑电压影响的典型负荷模型如下:

$$P_{L,j} = \sum_{j=1}^M P_{L0,j} \left(\frac{U_j}{U_{0,j}} \right)^\alpha \quad (6)$$

其中, P_L 为系统负荷; M 为负荷节点数; $P_{L0,j}$ 为第 j 个负荷节点扰动前的有功功率; $U_{0,j}$ 为第 j 个负荷节点扰动前的节点电压; U_j 为第 j 个负荷节点扰动后瞬时的节点电压; α 为电压影响因子, 文中取 $\alpha=1$ 。

在文献[16]的研究工作基础上, 基于惯性中心频率变化率, 计算计及负荷电压突变影响的系统不平衡功率:

$$P_{def} = P_{tur} - P_L \quad (7)$$

$$P_{shed} = P_{tur} - P_{L0} \quad (8)$$

其中, P_{tur} 为汽轮机出力; P_{shed} 为计及电压的系统不平衡功率。

因此有:

$$P_{shed} = \frac{2H_{eq}}{f_N} \frac{df_{COI}}{dt} S_{eq} + \sum_{j=1}^M P_{L0,j} \left[\left(\frac{U_j}{U_{0,j}} \right)^\alpha - 1 \right] \quad (9)$$

2 减载选址定容判据

当系统存在有功功率缺额时, 尽可能快地恢复系统频率至规定值是衡量低频减载方案优劣的关键^[17]。当前绝大多数低频减载研究都将系统负荷作为一个综合负荷考虑, 负荷无差异性且预先人为设定减载轮次和减载对象。而实际中, 负荷存在变化和差异性, 选择切除负荷时需要考虑负荷的差异性以及负荷切除后对系统频率恢复带来的影响。本文兼顾负荷频率特性差异和机组惯性差异, 在低频减载的过程中动态计算各负荷节点的综合指标, 用指标的大小作为减载地点及减载量的判据。

2.1 考虑频率特性的负荷指标

负荷有功-频率特性是指负荷有功功率随频率变化的特性:

$$P_{L,f} = a_0 P_{LN} + a_1 P_{LN} \frac{f}{f_N} + \cdots + a_m P_{LN} \left(\frac{f}{f_N} \right)^m + \cdots \quad (10)$$

其中, a_m 为与系统频率的 m 次方成正比的负荷占额定负荷的比例; P_{LN} 为系统额定负荷; f 为系统频率。

在实际系统中, 通常与频率的 3 次方以上成正比的负荷很少, 为简化计算, 忽略其影响, 将式(10)表示为:

$$P_{L,f*} = a_0 + a_1 f_* + a_2 f_*^2 + a_3 f_*^3 \quad (11)$$

其中, $P_{L,f*} = \frac{P_L}{P_{LN}}$; $f_* = \frac{f}{f_N}$ 。

进一步对上式进行频率微分, 可得:

$$K_L = \frac{dP_{L,f*}}{df_*} = a_1 + 2a_2 f_* + 3a_3 f_*^2 \quad (12)$$

其中, K_L 为负荷的频率调节效应系数, 不同的负荷节点对应着不同的频率调节效应系数。

当系统频率降低时,频率调节效应系数大的负荷从系统吸收的有功功率减少得更多,对频率恢复有利;频率调节效应系数小的负荷,需要从系统吸收的功率就更多,不利于系统频率恢复^[18]。因此,对各节点负荷的频率调节系数求倒数,选出倒数的最大值(记为 $1/K_{Lmin}$),以此作为基准对所有调节系数进行归一化,求出考虑负荷频率特性的指标。定义第 j 个负荷节点的负荷静特性指标为:

$$\lambda_j = \frac{1}{K_{Lj}} / \frac{1}{K_{Lmin}} = \frac{K_{Lmin}}{K_{Lj}} \quad (13)$$

其中, K_{Lj} 为第 j 个负荷节点的频率调节系数; K_{Lmin} 为 m 个频率调节系数中的最小值。

λ_j 越大,其负荷节点对应的频率调节效应系数 K_{Lj} 越小,从系统吸收的功率越多,为了充分利用负荷自身的频率调节,加快频率恢复速度, λ_j 越大的负荷应该作为首要切除对象。

2.2 考虑发电机受扰程度的负荷指标

多机系统中,有功扰动下的频率变化与发电机惯性时间常数以及扰动地点有着密切关系。在系统处于低频状态时,每台机组的受扰程度是不同的,表现为各发电机节点的频率变化是不同的,机组的受扰程度越大,其不平衡功率越大,因此优先考虑切除不平衡功率缺额大的机组的就近负荷以使系统尽快稳定。

在负荷指标提出前,首先需要确定负荷的归属问题。以发电机节点到负荷节点的电气距离来划分负荷的归属。电气距离的计算参考文献^[19],假设系统中节点数为 a ,边的条数为 b ,根据带权电力系统网络理论,求出系统的边权邻接矩阵 W_G 。对矩阵 W_G 使用 Floyd 算法求出所有节点间的最短电气距离矩阵 D 。依据矩阵 D 计算第 $j(j=1,2,\dots,M)$ 个负荷节点到系统中所有发电机的电气距离,其个数为 L 。找到其中的最短电气距离,将负荷 j 划归为具有该最短电气距离的对应机组的就近负荷。

各发电机的受扰程度采用不平衡功率衡量,不平衡功率越大,其受扰程度越严重。采集并计算扰动发生瞬间各发电机的频率变化率,采用式(4)计算各机组不平衡功率 $P_{defi}(i=1,2,\dots,N)$,取其最大值 P_{defmax} 作为归一化的基准值。定义考虑发电机受扰程度的负荷指标 β_{ij} 为:

$$\beta_{ij} = \frac{P_{defi}}{P_{defmax}} \quad (14)$$

其中, β_{ij} 为第 i 台发电机就近负荷 j 的指标,表征发电机的受扰程度。 β_{ij} 越大,该负荷 j 的就近发电机 i 受扰越严重,应优先考虑切除该负荷使系统尽快恢复稳定。

2.3 综合负荷指标

为同时考虑负荷频率特性以及计及发电机受扰

程度的负荷指标,提出用指标乘积的方式将二者统一结合起来,以各个负荷节点的综合指标作为低频减载量以及减载地点的判据。

定义综合负荷权值为:

$$\varphi_j = \lambda_j \beta_{ij} \quad \forall i, j \quad (15)$$

综合指标越大的负荷节点,其频率调节效应系数越小,从系统吸收的有功功率越多,且其就近发电机受扰程度越严重,越不利于频率恢复,因此在减载过程中,考虑优先承担较多的减载量,以尽快使频率得到恢复。

3 动态修正下的自适应低频减载策略

实际系统频率下降是一个非线性过程,在下降过程中 df/dt 不断减小。而当前绝大部分文献的自适应低频减载切负荷理论是建立在频率变化率的基础上,且为简化,认为系统频率下降变化过程是减载前 $df/dt=K(K$ 为常数)、减载后 df/dt 趋于0的线性过程。建立在这种频率线性变化过程的自适应低频减载会增加系统频率超调的概率^[20],这是当前自适应低频减载对减载量分配问题上存在的最大不足。

由于系统自身调节能力以及负荷频率特性的影响,在每一轮减载动作实施后,系统频率变化率不会维持恒定,这将导致不平衡功率的变化。减载实施之前,频率下降率最大,减载动作每实施一轮,系统频率得到缓和,对应的不平衡功率将减少,所需的负荷切除量也相应变小。而传统自适应方案没有对减载量进行修正,依然按照最初时刻计算的最大不平衡功率实施减载,将不可避免地造成负荷的过切。

参照实际电网减载方式,划分4级动作频率阈值:49.2 Hz、49 Hz、48.8 Hz、48.6 Hz。按照传统自适应低频减载方案^[16],设定每轮初始切除量 $P_{shed,k}(k=1,2,3,4)$ 依次为不平衡功率的15%、20%、20%、45%。利用 WAMS 提供的测量数据,根据式(9)计算得到系统的初始不平衡功率,以此作为低频减载的基础减载量。

由式(4)可知,不平衡功率与频率变化率呈近似线性化关系,频率变化率降低 $x\%$,不平衡功率也近似降低 $x\%$ 。基于 WAMS 测量相邻2轮减载动作阈值处的频率变化率 df_{col}/dt ,求其差值,并与初始频率变化率 $df_{col,max}/dt$ 相比较,得到频率变化率变化梯度 $\Delta_k\%$:

$$\Delta_k\% = \frac{df_{col,k-1}/dt - df_{col,k}/dt}{df_{col,max}/dt} \times 100\% \quad (16)$$

其中, $df_{col,k-1}/dt - df_{col,k}/dt$ 为相邻2轮减载动作阈值处的频率变化率的差值。

频率变化率变化梯度 $\Delta_k\%$ 表征了系统不平衡功率的变化,以此作为每轮减载量的修正依据。因此在

第 k ($k=1,2,3,4$) 轮减载动作实施之前, 计算 $\Delta_k\%$, 对第 k ($k=1,2,3,4$) 轮减载量进行如下修正:

$$P'_{shed,k} = P_{shed,k} - \Delta_k\% \quad (17)$$

得到第 k ($k=1,2,3,4$) 轮的减载量后, 考虑到控制的快速性要求, 结合提出的负荷综合指标, 设定第 j 个负荷节点的减载量为:

$$P_{shed,j} = P'_{shed,k} \varphi_j / \sum_{j=1}^M \varphi_j \quad (18)$$

依次按照频率动作阈值实施低频减载动作, 具体低频减载策略流程如图 1 所示。

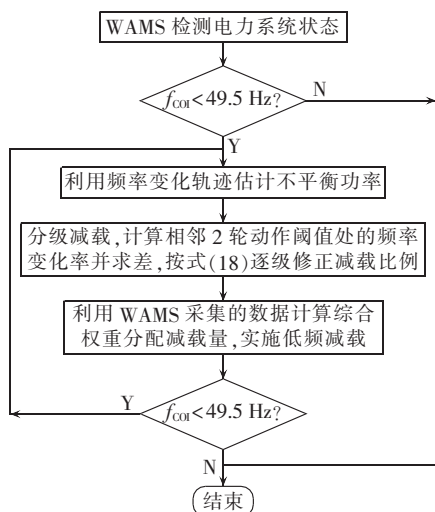


图 1 低频减载流程图

Fig.1 Flowchart of UFLS

4 算例仿真

为验证所提减载策略的动态修正以及频率恢复效果, 选取 IEEE 68 节点系统中的区域 1 作为孤立电网来对其实施控制, 如图 2 所示。

发电机、变压器、线路的主要参数参见文献[14]。仿真算例计及交流励磁系统模型以及调速器和原动机模型; 负荷模型考虑恒功率负荷、恒电流负荷、恒

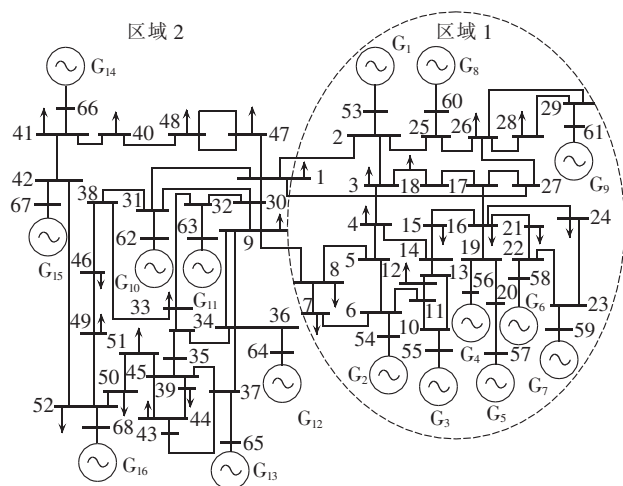


图 2 IEEE 68 节点系统图

Fig.2 IEEE 68-bus system

阻抗负荷以及与频率有关的负荷模型; 区域 2 向区域 1 送电以保持功率平衡, 其中区域 1 包含 9 台发电机以及 17 个负荷节点。4 s 时刻, 将联络线 1-2、1-27、9-8 同时断开, 模拟系统解列工况。此时区域 1 成为孤立电网, 出现较大功率缺额, 需要实施低频减载才能维持孤立电网的频率稳定。图 3 为 WAMS 所提供的电网解列后系统频率的变化情况。

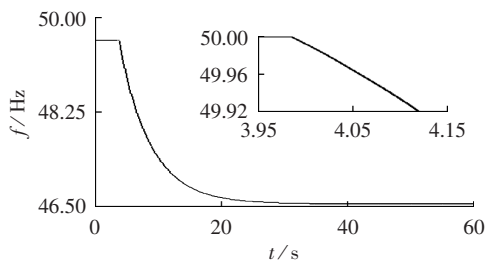


图 3 电网解列瞬间系统频率变化

Fig.3 System frequency variation at grid-splitting moment

将所提减载方案应用于该孤立电网。采用数值计算方法对 4 s 时刻测量得到的微小邻域内的频率进行微分, 本文选取如图 3 所示的 WAMS 频率窗口扰动后 3 个周期内的数据, 利用式(3)计算并求平均, 以此作为 4 s 时刻的系统频率变化率。由式(9)计算系统频率下降瞬间的不平衡功率作为负荷基本切除量。图 4 展示了系统解列瞬间某负荷节点电压标么值的变化情况。

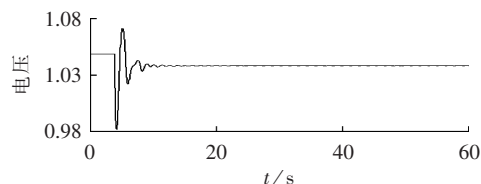


图 4 电网解列瞬间负荷节点电压变化

Fig.4 Load node voltage variation at grid-splitting moment

结合图 3 与图 4, 在系统频率下降瞬间, 负荷节点电压也同时大幅下降。在扰动后 1~2 s 内, 电压下降较之频率下降更为明显, 此后, 由于励磁系统的调节作用, 电压逐步恢复, 频率继续下降。这验证了在扰动发生初期, 电压变化对负荷有功功率变化起主导性作用, 之后频率成为主要影响因素。采用低阶频率响应模型, 不计及电压影响, 根据式(4)计算的系统不平衡功率 $P_{def}=9.9498$ p.u. (基准功率 100 MW)。按照本文所提的计及电压影响的模型式(9), 系统不平衡功率为 $P_{def}=8.4911$ p.u., 可见考虑电压前后, 不平衡功率数值上有明显区别。所以负荷电压的突变因素在不平衡功率的估计中的影响不容忽视。

在扰动发生瞬间, 系统惯性中心的频率变化率记为最大频率变化率: $df_{col,max}/dt = -0.8695$ Hz/s。当

频率到达第一轮动作阈值 49.2 Hz 时,测量此时系统频率变化率,并由式(16)计算得到 $\Delta_1\%=4.9\%$ 。按照式(17)对第一轮减载量进行修正,实际减载量为 $P'_{shed1}=15\%-4.9\%=10.1\%$ 。由式(15)计算得到各个负荷节点的综合指标,并按照式(18)对该轮减载量进行分配。

类似地,在每轮减载动作之前,逐级计算前后 2 轮减载动作阈值处的频率变化率及其变化量,并按式(17)对减载量进行修正并实施减载动作。所提动态修正低频减载方案与传统自适应低频减载方案^[11]的减载量对比如表 1 所示。

表 1 动态修正效果对比
Tab.1 Comparison of dynamic correction effect

减载轮数	减载量	
	文献[14]方案	本文方案
第一轮	15%	10.10%
第二轮	20%	19.87%
第三轮	20%	19.77%
第四轮	45%	43.40%
总计	100%	93.24%

第一轮之后,各轮减载修正量依次为: $\Delta_2\%=0.13\%$ 、 $\Delta_3\%=0.23\%$ 、 $\Delta_4\%=1.6\%$ 。动态修正后最终总减载量比传统自适应减载方案减少了 6.76%,充分证明了动态修正能利用系统自身调节效应,减少负荷切除量。

为验证所提负荷综合指标对缩短频率恢复时间的有效性,采用 3 种减载分配方案进行对比,并且都采用动态修正减载方法。方案 1 为本文所提的减载方案,即分 4 轮动作,每轮对减载量进行动态修正,考虑多因素综合指标选址定容;方案 2 仅按负荷特性指标来分配减载量;方案 3 把负荷作为综合负荷考虑,仅按节点负荷比例进行减载量分配,即对应节点负荷越大,相应的减载量就越多。

低频减载第一轮动作后,采用不同低频减载方案所得到的频率恢复曲线如图 5 所示。

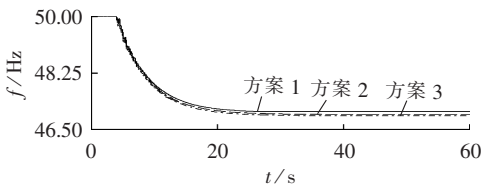


图 5 第一轮动作后频率恢复曲线比较
Fig.5 Comparison of frequency recovery after first-round load shedding

由图 5 可知,方案 1 由于在首轮保证了足够的负荷切除量,可以较为明显、快速地抑制频率的下降速度,系统最终频率稳定在 47.073 15 Hz,优于方案 2 的 46.985 8 Hz 和方案 3 的 46.941 12 Hz,系统频率得到了更好的恢复。

低频减载 4 轮动作全部完毕,各方案的频率恢

复曲线如图 6 所示,相应负荷减载量标么值及频率恢复时间如表 2 所示。

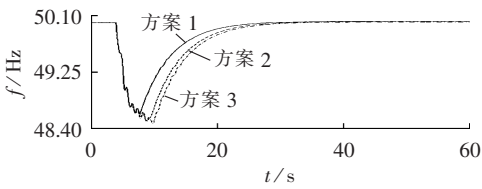


图 6 4 轮动作后频率恢复曲线比较
Fig.6 Comparison of frequency recovery after fourth-round load shedding

表 2 3 种方案减载量比较
Tab.2 Comparison of load shedding amount among 3 schemes

减载轮数	负荷减载量		
	方案 1	方案 2	方案 3
第一轮	0.862 6	0.851	0.860
第二轮	1.687 1	1.697	1.704
第三轮	1.678 6	1.694	1.696
第四轮	3.684 0	3.664	3.678
总计	7.912 0	7.906	7.938
恢复时间/s	29.32	32.49	35.87

由表 2 可知,方案 1 的减载总量为 7.912 p.u.,方案 2 为 7.906 p.u.,方案 3 为 7.938 p.u.,就减载总量而言,仅考虑负荷特性的方案 2 是最少的;方案 1 频率恢复到 50 Hz 的时间为 29.32 s,方案 2 为 32.49 s,方案 3 为 35.87 s,就频率恢复速度而言,方案 1 无疑是最优的。

低频减载策略的优劣不仅仅体现在减载量的差别,频率恢复速度也同样值得关注。对所提 3 个方案进行综合对比。方案 3 在减载量分配时,仅按照负荷比例的大小来切除,负荷作为综合负荷而无差异性,无论是恢复时间还是减载量都差强人意。方案 1 在首轮的减载量是最高的,而保证首轮减载量对系统频率恢复的效果具有重要意义^[21],虽然总减载量略高于方案 2,但是频率恢复上升明显,恢复曲线高于方案 2 和方案 3,频率恢复速度最快,证明其对系统关键的地点负荷实施了有效的控制措施,满足保护动作快速性的要求,同时,方案 1 频率曲线恢复平滑,说明能很好地适应系统的运行情况。

综合减载量和频率恢复时间两方面考虑,计及电压对不平衡功率的影响后,不平衡功率估算更准确;传统自适应低频减载方案基于频率线性变化,不能应对系统运行中不平衡功率的变化,考虑动态修正的低频减载策略,充分利用了系统自身的频率恢复特性,使得总减载量较之传统自适应低频减载方案有了明显的减少;在考虑动态修正自适应低频减载的基础上,进一步采用多因素综合负荷指标进行减载分配,虽然相对于其他选址定容方案,在减载量上不是最少的,但是恢复时间最短,能以较小的代价使系统频率更快地恢复稳定,综合对比而言是最优的。

5 结论

保障电力系统暂态稳定具有重大的意义,传统低频减载基于离线计算,不具备良好的适应性以及实时性。本文提出了一种基于 WAMS 的自适应低频减载新方法,主要研究成果与结论如下。

a. 将 WAMS 提供的数据信息与低频减载相结合,将传统低频减载与自适应低频减载相结合并以改进,缩短了控制的反应时滞。

b. 计及电压对不平衡功率的影响并以系统惯性中心频率变化率来衡量系统不平衡功率,具有更高的估算精度。

c. 充分利用系统自身的频率调节特性,根据不平衡功率与频率变化率的近似线性关系,使用频率变化率变化量修正各轮减载量,动态调节负荷切除量,有效减少系统过切情况,提高系统运行的经济性。

d. 基于 WAMS 的多因素负荷综合指标,考虑到每个负荷节点负荷特性以及每台发电机惯性差异,更加合理全面地分配减载量,使系统频率恢复更快,满足快速性的要求。

所提方法为电力系统在线频率控制应用提供了新思路与参考。

参考文献:

- [1] 顿敦,许先华,吴兆国. 电力稳定控制系统低频低压减载的最优策略实现[J]. 电力自动化设备,2006,26(4):28-31.
DUN Dun,XU Xianhua,WU Zhaoquo. Realization of optimal strategy for power system low-frequency and low-voltage load reduction[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(4):28-31.
- [2] 赵强,刘肇旭,张丽. 对中国低频减载方案制定中若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化,2010,34(11):48-53.
ZHAO Qiang,LIU Zhaoxu,ZHANG Li. Discussions on the several problems of under-frequency load shedding scheme in China[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(11):48-53.
- [3] 薛禹胜,任自成,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.
- [4] TERZIJA V V,KOGLIN H J. Adaptive underfrequency load shedding integrated with a frequency estimation numerical algorithm[J]. IEEE Proceedings-Generation,Transmission and Distribution,2002,149(6):713-718.
- [5] 林湘宁,李正天,薄志谦,等. 适用于微网孤岛运行的低频减载方法[J]. 电网技术,2010,34(3):16-20.
LIN Xiangning,LI Zhengtian,BO Zhiqian,et al. An under-frequency load shedding method adaptive to the islanding operation of micro-grids[J]. Power System Technology,2010,34(3):16-20.
- [6] 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.
- [7] HALEVI Y,KOTTICK D. Optimization of load shedding system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,1993,8(6):593-598.
- [8] ANDERSON P M,MIRHEYDAR M. An adaptive method for setting under frequency load shedding relays[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1992,7(2):647-655.
- [9] SEETHALEKSHMI K,SINGH S N,SRIVASTAVA S C. WAMS assisted frequency and voltage stability based adaptive load shedding scheme[C]//Power & Energy Society General Meeting. Calgary,AB,Canada:IEEE,2009:1-8.
- [10] 吴麟琳,黄少锋. 基于频率特征的失步解列判据原理[J]. 电力自动化设备,2013,33(1):18-22.
WU Linlin,HUANG Shaofeng. Out-of-step oscillation criterion based on frequency characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(1):18-22.
- [11] 徐伟,鲍颜红,徐泰山. 电力系统低频振荡实时控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):98-101.
XU Wei,BAO Yanhong,XU Taishan. Real-time control of power system low-frequency oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):98-101.
- [12] 周宏,李强,林涛,等. 基于 WAMS 量测数据的电网扰动和操作类型识别[J]. 电力自动化设备,2011,31(2):7-11.
ZHOU Hong,LI Qiang,LIN Tao,et al. Power system disturbance and operation identification based on WAMS[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(2):7-11.
- [13] PASAND M S,MIHALIC R. New centralized adaptive under frequency load shedding algorithms[C]//2007 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering. Montreal,Que,Canada:IEEE,2007:44-48.
- [14] ETEZADI-AMOLI M. On underfrequency load shedding schemes[C]//Proceedings of the Twenty-Second Annual North American Power Symposium. Auburn,AL,USA:IEEE,1990:172-180.
- [15] LI A,CAI Z. A method for frequency dynamics analysis and load shedding assessment based on the trajectory of power system simulation[C]//3rd International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 2008. [S.l.]:IEEE,2008:1335-1339.
- [16] RUDEZ U,MIHALIC R. Monitoring the first frequency derivative to improve adaptive underfrequency load-shedding schemes[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(2):839-846.
- [17] 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 on-line estimate of primary frequency control ability in electric power system[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(3):72-76.
- [18] 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.
- [19] 李运坤,吕飞鹏. 基于最短电气距离的运行方式组合方法[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(15):24-37.
LI Yunkun,LÜ Feipeng. Method for power syetem operation mode combination based on shortest electrical distance[J]. Power

[20] 孔祥平,张哲,尹项根,等. 计及撬棒保护影响的双馈风力发电机短路电流特性研究[R/OL]. [2012-03-21]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/content/201203-595>.

作者简介:

龚文明(1986-),男,湖北恩施人,博士研究生,研究方向为风力发电与柔性直流输电技术(E-mail:gwm@mail.iee.ac.cn);



龚文明

胡书举(1978-),男,河南南阳人,副研究员,博士,通讯作者,研究方向为风力发电、光伏发电系统电气控制及检测技术(E-mail:hushuju@mail.iee.ac.cn);

许洪华(1967-),男,山东聊城人,研究员,博士研究生导师,研究方向为风力发电、光伏发电及其混合发电系统技术。

Response model of DFIG for real-time simulation of large-scale wind farms

GONG Wenming^{1,2,3}, HU Shuju^{2,3}, XU Honghua^{2,3}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Key Laboratory of Wind Energy Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A response model of DFIG (Doubly Fed Induction Generator) is proposed based on its dynamic response, which, instead of differential equations, applies algebra methods to improve its computational efficiency for the real-time simulation of wind farm and the in-loop test of its hardware controller. Two kinds of DFIG operation are classified according to grid voltage: normal operation and faulty operation. As the output currents of DFIG well follow the references during normal operation, it can be equated to an inertia component with small time constant. As large impulsive currents may appear in both its stator and rotor during grid voltage dip, the impacts of pre-fault condition, generator parameters and Crowbar resistance on fault current are studied and the analytical expressions of fault currents are derived based on the flux invariance principle. The comparison with the conventional 4th-order model verifies the correctness of the proposed model.

Key words: wind power; doubly fed induction generator; low voltage ride through; response model; Crowbar resistor; wind farms

(上接第 100 页 continued from page 100)

- System Protection and Control, 2010, 38(15): 24-37.
- [20] 赵强,刘肇旭,张丽. 对中国低频减载方案制定中若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(11): 48-53.
- ZHAO Qiang, LIU Zhaoxu, ZHANG Li. Discussions on the several problems of under-frequency load shedding scheme in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(11): 48-53.
- [21] 熊小伏,李东晋. 基于在线负荷检测的变电站低频减载方案[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9): 32-35.
- XIONG Xiaofu, LI Dongjin. Under-frequency load shedding based on online load detection for electric substations [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9): 32-35.

作者简介:



宋兆欧

宋兆欧(1988-),男,四川成都人,硕士研究生,从事电力系统稳定与控制方面的研究工作(E-mail:cklein927@163.com);

刘俊勇(1963-),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,主要从事电力市场、电力系统稳定与控制、电力系统可视化等方面的研究工作;

刘友波(1983-),男,四川成都人,讲师,博士,从事电力系统脆弱性评估与连锁故障方面的研究工作。

WAMS-based adaptive UFLS considering dynamic correction

SONG Zhaoou^{1,2}, LIU Junyong^{1,2}, LIU Youbo^{1,2}, MASOUD Bazargan³, LIANG Wuxing³

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Sichuan Smart Grid Key Laboratory, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. ALSTOM Grid Research & Technology Centre, Stafford ST17 4LX, UK)

Abstract: Traditional UFLS (Under-Frequency Load Shedding) applies the method of successive approximation, which may cause over or under shedding due to its lack of adaptability to operational conditions of system. An adaptive UFLS based on WAMS (Wide Area Measurement System) is proposed with the consideration of dynamic correction. Based on low-order frequency response model, the effect of voltage on the imbalanced active-power is considered and the active-power deficit is estimated with the system response trajectory of short cycle. The self-recovery ability of system frequency is considered and the frequency variation rate is used to dynamically correct the load shedding amount. The load shedding amount of each load node is comprehensively determined by multiple indexes, including load characteristics and generator inertia. Simulative results of IEEE 68-bus system indicate that, the proposed method effectively reduces the load shedding amount and the frequency recovery time, guaranteeing the stable system operation.

Key words: WAMS; UFLS; active-power deficit; static load characteristics; generator inertia