综合电压频率动态交互影响的自动减负荷控制新方法

侯玉强,方勇杰,杨卫东,鲍颜红,徐泰山,刘福锁,李碧君 (国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司,江苏省南京市 210003)

摘要:基于单一的频率量测或单一的电压量测而独立动作的传统低频低压减负荷控制装置,未计 及受扰系统电压与频率之间的实时动态交互,难以完全适应系统初始工况、负荷特性或扰动形式的 变化,某些情况下可能出现严重的欠控制或过控制。文中提出一种在装置的实时控制算法中计及 电压与频率动态交互影响的自动减负荷控制方法,其核心是测量装置安装节点的电压、频率以及负 荷有功功率,并计及与当前系统初始工况、负荷特性或所发生扰动形式相对应的频率电压相关系 数,实时计算综合状态量以触发自动减负荷控制装置的分轮次动作。对实际电网的时域仿真结果 表明,该方法可较好地适应系统初始工况、负荷特性或扰动形式的变化。

关键词:低频减负荷;低压减负荷;动态交互;频率电压相关系数;综合状态量

0 引言

电力系统自动减负荷控制是防止电力系统尤其 是受端系统在遭受极其严重故障后导致稳定破坏、 发生大面积停电事故的重要技术手段^[1]。国内外普 遍采用低频减负荷(UFLS)和低压减负荷(UVLS) 自动装置作为电力系统安全稳定自动控制的最后一 道防线^[2],来应对系统遭受大扰动后可能造成的有 功功率缺额或无功功率不足^[3-4]。

目前对 UFLS/UVLS 的研究已经形成各自的 方法和体系^[5-6],出现了许多新的理论和算法^[7-10], 但是这些研究均未突破将低频和低压问题分别对待 的传统思路。现有的低频低压减负荷控制装置也都 是反应于单一的状态量测(频率或电压)而动作,未 计及系统受扰后电压与频率之间的实时交互影响; 而且,减负荷控制方案一旦整定好,就不再随运行方 式、负荷特性及扰动形式的变化而变化。

分析表明,电力系统运行过程中的电压与频率 之间并不是孤立的,存在耦合和相互影响^[11]。一些 大停电事故说明,如果系统的稳定破坏导致电压下 降过大、过快或是发生电压崩溃,UFLS往往不能动 作^[12]。文献[12]同时指出,由于系统电压与频率相 互关联,必须同时考虑电压和频率的下降效应。基 于单一状态量变化制定的传统减负荷控制方案,未 能从根本机理上计及受扰系统电压与频率之间的实 时动态交互影响,难以真实地反映系统受扰后电压

收稿日期: 2009-08-04; 修回日期: 2009-10-08。

国家发改办高技([2008]2012)、国家电网科([2008]1360) "电力系统安全稳定分析与控制"重点实验室完善建设和国 家电网公司"基于多代理技术的低频低压减负荷技术研究" 资助项目;已申请国家发明专利(申请号:200910033423.2)。 和频率的动态变化过程,从而在系统初始工况、负荷 特性及扰动形式与离线设计所用典型方式偏离较大 时,可能出现严重的欠控制或过控制,导致不必要的 欠切或过切^[13]。因此,研究一种能够在实时控制算 法中计及电压与频率交互影响的自动减负荷控制新 方法非常必要。

1 新方法的原理

1.1 电压、频率和功率的关联分析

由于突然的功率缺额引起系统频率下降的同时,系统负荷功率往往也发生变化。在频率动态变 化过程中,机组间的同步摇摆又会导致系统潮流和 各节点电压发生动态变化。特别是在系统解列后, 低频减负荷装置又动作的情况下,电压幅值可能变 化很大。电压变化又影响剩余负荷吸收电磁功率的 变化,转而影响系统的频率动态变化过程^[14]。

对多机系统而言,其等值单机系统的转子运动 方程^[15]如下所示:

$$T_{\rm G} \, \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = P_{\rm m}(t) - P_{\rm e}(t) \tag{1}$$

式中:*T*_G 为等值机的惯性时间常数;*P*_m 和 *P*_e 分别 为等值机输入的机械功率和输出的电磁功率,后者 因系统频率和节点电压的变化而变化;ω 为等值机 的转速(标幺值),与标幺后的频率等价。

将式(1)在工作点附近线性化, ΔP_e 以频率和电 压的变化量的全微分形式表示,并以频率 f代替转 速 ω ,重写式(1)得:

$$T_{\rm G} \frac{\mathrm{d}\Delta f}{\mathrm{d}\Delta t} = \Delta P_{\rm m} - \left(\frac{\partial P_{\rm e}}{\partial f}\Delta f + \frac{\partial P_{\rm e}}{\partial U}\Delta U\right) \quad (2)$$

可以看出,式(2)等号左边仅考虑了频率量的变化。为计及电压量的变化,式(2)等号两边同时乘以

 ΔU 得:

$$T_{\rm G}\Delta U \frac{\mathrm{d}\Delta f}{\mathrm{d}\Delta t} = \Delta P_{\rm m}\Delta U - \frac{\partial P_{\rm e}}{\partial U}\Delta U \left(\frac{\partial U}{\partial f}\Delta f + \Delta U\right) \quad (3)$$

以 $\Delta P_{e}/\Delta U$ 近似代替 $\partial P_{e}/\partial U$,从而式(3)可简 化为:

$$T_{\rm G}\Delta U \frac{\mathrm{d}\Delta f}{\mathrm{d}\Delta t} = \Delta P_{\rm m} \Delta U - \Delta P_{\rm e} \left(\frac{\partial U}{\partial f} \Delta f + \Delta U\right) \quad (4)$$

式(4)中因子∂U/∂f 计及了暂态过程中电压与 频率的动态交互作用,将其定义为"频率电压相关系 数"。对实际系统而言,各负荷节点的频率电压相关 系数与系统拓扑结构、初始工况、负荷特性及受扰形 式等多个因素相关。如何准确计算与之相对应的频 率电压相关系数是一个有待深入研究的难题。本文 作为初步探索,对于具体研究的系统仅考虑了系统 初始工况、负荷特性和故障类型的变化对该系数的 影响。以符号 K 代替因子∂U/∂f,式(4)可进一步 简化为:

 $T_{\rm G}\Delta U \frac{\mathrm{d}\Delta f}{\mathrm{d}\Delta t} = \Delta P_{\rm m} \Delta U - \Delta P_{\rm e} (K\Delta f + \Delta U) \quad (5)$

1.2 综合状态量

当受端电网遭受停机或联络线开断等故障导致 功率缺额后,电网向负荷提供电磁功率的能力减弱, 难以满足所有负荷的初始有功需求,系统频率开始 下降。对负荷节点而言,ΔP。可视为负荷初始有功 功率 P₂₀与其在暂态过程中从电网吸收的电磁功率 P_e的差值,P₂₀在无减负荷措施时保持不变。一旦 自动装置动作切除部分负荷,P₂₀变为减负荷前的初 始值与所切负荷量之差。

由于电压、频率动态过程中存在振荡,相邻采样 时刻的电压或频率差亦振荡变化。为提高装置动作 可靠性,可定义 ΔU 和 Δf 为初始值(或额定值)与 暂态采样值之差。从而,对依赖于就地量测动作的 自动减负荷控制装置而言,其可获得的变量仅有 $\Delta U, \Delta f, \Delta P_{e}$ 。受式(5)启发,定义减负荷控制新方 法的综合状态量 D_P :

$$D_P = | K\Delta f + \Delta U | \Delta P \tag{6}$$

式(6)可用于分轮次触发自动减负荷控制装置 动作(略去下标 e)。

综上可知,该方法的考察量中不仅考虑了负荷 节点的频率变化量、电压变化量和负荷功率不平衡 量,而且在一定程度上计及了暂态过程中电压和频 率通过负荷有功功率产生的动态交互作用。

1.3 频率电压相关系数的实时获取

系统遭受大扰动后往往导致频率或电压的大幅 下降,为防止装置在故障期间误动作,工程上通常采 取某种措施将其闭锁,在故障清除后解除闭锁。若 故障清除后系统暂态频率或电压仍维持在可接受水 平,表明系统频率和电压均稳定,装置不应启动以防 止误动造成过切。因此,可将 *f*(*t*)≤*f*。或 *U*(*t*)≤ *U*。作为装置的启动判据,其中 *f*。和 *U*。分别为临界 可接受的频率和电压水平。

假设装置解锁时刻为 t_0 ,在 $t \ge t_0$ 时间段内,根据自动减负荷控制装置实时测量得到的频率 f(t)和电压 U(t),利用下述公式实时计算时刻 t 的系数 K(t):

$$K(t) = K_0 + (K(t') - K_0) \frac{t' - t_0}{t - t_0} + \frac{F(t') + F(t)}{2} \frac{t - t'}{t - t_0}$$
(7)

式中:t 为当前采样时刻;t' 为上一个采样时刻; K_0 和 α 均为常量,前者与所设定的 f_c 和 U_c 有关,后者 为转换因子,一般取 1.0;变量 F(t) 的定义式为 $F(t) = f(t) - f_0(U(t) - U_c)/K_0 - f_c; f_0$ 为电网额 定频率,根据中国电网实际情况,取 50.0 Hz。

当 $t = t_0$ 时,系数 $K(t_0)$ 的计算式为 $K(t_0) = K_0 + \alpha F(t_0)$ 。由式(7)可知,时刻t的系数K(t)已充分计及了 $t_0 \sim t$ 时间段内频率与电压的动态交互作用。

2 新方法的实现方案

基于上述分析,新方法在自动减负荷控制装置 中的实现步骤可描述如下。

步骤1:测量电网在初始工况下各自动减负荷 控制装置所在母线的初始电压、频率及负荷初始有 功功率;

步骤 2:当电网遭受扰动,实时测量电网在扰动 后各自动减负荷控制装置所在母线的暂态电压、频 率及有功功率;

步骤 3:若装置在扰动后闭锁,转至步骤 2,否则 利用式(7)计算从装置解锁时刻至装置启动前时间 段内的频率电压相关系数;

步骤 4:当监测到频率或电压下降到可接受水 平之下时,装置及时启动并根据式(6)实时计算 D_P;

步骤 5:根据 D_P 的变化分轮次触发,实施切负荷。

与传统 UFLS/UVLS 类似,采用"基本轮+特殊轮"的设计,基本轮动作时保持选择性,目的是为 了防止故障后频率或电压的快速下降并尽量减少过 切;特殊轮动作时不保持选择性,其目的是为了避免 基本轮动作后频率或电压长时间悬停在某一较低水 平^[16-17]。减负荷方案的制定仍以电网可能存在的最 大功率缺额作为参考,各轮次参数的整定亦与传统 UFLS/UVLS 整定方法类似。

3 仿真验证

将新方法的控制算法和动作逻辑在电力系统安 全稳定量化分析与优化决策软件 FASTEST 中实 现,采用实际的地区电网数据进行时域仿真来验证 该方法的有效性。

3.1 对运行工况变化的适应性

以附录 A 图 A1 所示的地区电网为例。该地区 电网通过 Bus1-Bus3 和 Bus2-Bus3 这 2 条 500 kV 双回线与主网联系,并从主网受人大量功率。考虑 如下预想故障:当 Bus3 的一台主变发生故障,变压 器保护动作将其开断的同时另一台主变保护误动, 从而造成该地区孤网运行并存在大量功率缺额。如 不能及时切除部分多余负荷,有可能造成频率或电 压的快速崩溃。考虑 3 种不同的运行方式,各方式 下该电网受入功率见附录 A 表 A1。

由于初始工况下受入量不同,导致系统孤网运 行时的功率缺额也不相同。因此,3种运行方式下 发生上述故障后电网各负荷节点的电压、频率及有 功功率动态响应过程均存在差异,使得各方式所对 应的频率电压相关系数也不同。为了确保系统在发 生最严重的功率缺额情况下仍然能恢复稳定,以受 入功率最大的方式3配置减负荷方案,各轮次动作 整定值如附录A表A2所示。

当监测到节点频率或电压跌落至可接受水平以下时,装置及时启动,并根据实时计算出的 D_P 的变化情况分轮次切除负荷。3 种方式下 Bus19 节点的电压(标幺值)和频率动态响应曲线如图 1 所示。







由于暂态过程中频率空间分布不明显,可能使 得仅仅基于频率量测动作的传统 UFLS 均匀动作, 从而扩大了故障辐射范围。与传统方法相比,基于 该方法实施减负荷控制可实现装置在近故障点优先 动作,且参与动作的轮次较远故障点多。由图 1 可 见,3 种方式下系统各节点电压、频率均能恢复到可 接受水平,且实现切负荷量与受入功率基本一致,说 明该方法能较好地适应系统运行工况的变化。

3.2 对负荷特性变化的适应性

在离线仿真环境下,负荷特性的变化可通过对 负荷模型的不同描述加以表征。不同的负荷特性对 扰动后的暂态频率和电压响应都有较大的影响,而 传统的低频低压减负荷控制方法没有在实时控制算 法中考虑负荷特性对系统动态过程的影响,难以较 好地适应负荷特性的变化,某些情况下可能造成装 置的拒动而导致系统崩溃。

考察的地区电网及预想故障与 3.1 节相同,初 始运行方式为附录 A 表 A1 中方式 3,考虑 2 种负 荷模型:模型 1 为静态负荷模型,模型 2 为计及 30%感应电动机的综合负荷模型。装置各轮次整定 方案保持附录 A 表 A2 不变。发生上述预想故障 后,Bus19 节点的电压和频率动态响应曲线如图 2 所示。



图 2 不同负荷模型下,Bus19 节点的暂态电压和 频率响应曲线 Fig. 2 Response curves of transient voltage and frequency

Fig. 2 Response curves of transient voltage and frequency of Bus19 for different load models

由文献[18]可知,采用模型2时系统在故障后 电压长期悬停在0.80以下,导致网内负荷有功功率 显著下降,频率始终维持在额定值左右,仅配置传统 UFLS时可能出现因装置拒动导致系统失稳;配置 传统 UFLS/UVLS时,由于低频减负荷与低压减负 荷动作相互独立,缺乏对频率、电压实时动态交互影 响的考虑,从而可能形成两者无序动作,导致动作轮 次增加,切负荷量增大。

图 3 给出了 2 种负荷模型下,基于不同切负荷 控制方法时 Bus19 节点的控制装置动作情况(各轮 次动作频率和动作时间)。新方法和传统方法装置 动作情况分别用叉形符号和方形符号表示。从中可 以看出,基于本文提出的新方法实施自动切负荷时, 动作轮次相对较少;与配置传统的 UFLS/UVLS 相 比,基于新方法动作的切负荷总量在 2 种模型下分 别减少了50 MW和 150 MW。



图 3 不同负荷模型下, Bus19 节点的自动减负荷 控制装置动作情况 Fig. 3 Action of automatic load shedding device in Bus19 for different load models

分析表明,负荷特性的变化实质上是改变了系 统各节点电压与频率动态交互影响的程度,即频率 电压相关系数的大小。新方法将频率电压相关系数 引入综合状态量,从而能够较好地适应电网在不同 时间段内负荷特性的变化。

3.3 对扰动形式变化的适应性

即使初始工况与负荷特性相同,扰动形式的变 化同样可能导致暂态电压和频率动态响应发生较大 差异。在离线仿真环境下,扰动形式的变化可通过 设置不同的预想故障加以实现。

以附录 A 图 A2 所示的地区电网为例。考虑 2 类预想故障。

故障1:Bus1-Bus2 双回无故障跳闸。

故障 2:Bus1-Bus2 一回三相永久性故障,保护 延时跳开时另一回保护误动。

2 类故障均将导致该地区电网孤网运行,并存 在大量功率缺额,必须及时切除多余负荷以恢复系 统稳定。

整定切负荷控制装置各轮次动作方案如附录 A 表 A3 所示。发生上述预想故障后,Bus5 节点的电 压和频率动态响应曲线如图 4 所示。

由图 4 可知,发生故障 2 时,即使配置传统 UFLS,也会因频率难以下降到动作整定值而导致 装置拒动。新方法计及了扰动形式的变化对频率电 压相关系数的影响,可以较好地适应扰动形式的变 化。



频率动态响应曲线 Fig. 4 Dynamic response curves of transient voltage and

frequency of Bus5 under different faults

4 结语

在系统受扰后的暂态过程中,电压与频率之间 存在着耦合和动态交互影响。本文提出了一种综合 电压与频率动态交互影响的自动减负荷控制新方 法。通过在减负荷实时控制方法中计及电压与频率 之间的动态交互作用,从而影响自动减负荷控制装 置动作的时机和地点,使得减负荷控制策略能较好 地适应系统运行工况、负荷特性或扰动形式的变化。 对实际地区电网的时域仿真结果验证了该方法的有 效性和可靠性。

应当指出,本文为研究大扰动下电网自动减负 荷控制提供了新的研究思路,所提出的方法还只是 一种考虑电压与频率动态交互影响以及将功率量引 入自动减负荷控制方法方面的初步探索,频率电压 相关系数实时辨识方法的广泛适应性仍是需要进一 步探索的问题。

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info. com/aeps/ch/index.aspx)。

参考文献

- [1] KUNDER P. Power system stability and control. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [2] DL/T 723-2000 电力系统安全稳定控制技术导则.北京:中国电力出版社,2000.
- [3] 王梅义,吴竞昌,蒙定中.大电网系统技术.北京:中国电力出版 社,1995.
- [4] LADHANISS, ROSEHART W. Under voltage load shedding

for voltage stability: overview of concepts and principles// Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting: Vol 2, June 6-10, 2004, Denver, CO, USA: 1597-1602.

[5] 陈俊山,洪兰秀,郑志远. 电力系统低频减载研究与应用发展. 继 电器,2007,35(14):79-82.

CHEN Junshan, HONG Lanxiu, ZHENG Zhiyuan. Investigation and application of under-frequency load shedding. Relay, 2007, 35(14): 79-82.

[6] 刑国华, 乔卫东. 低压减载方案研究综述. 华东电力, 2005, 33(12):23-26.

XING Guohua, QIAO Weidong. Study of undervoltage load shedding schemes. East China Electric Power, 2005, 33(12): 23-26.

- [7] TERZIJA V V. Adaptive underfrequency load shedding based on the magnitude of the disturbance estimation. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(3): 1260-1266.
- [8] AMRAEE T, RANJBAR A M, MOZAFARI B, et al. An enhanced under-voltage load shedding scheme to provide voltage stability. Electric Power Systems Research, 2007, 77 (8): 1038-1046.
- [9] 邹晴,林湘宁,翁汉琍. 基于闭环控制的独立电力系统低频减载 策略.电力系统自动化,2006,30(22):34-37,88. ZOU Qing, LIN Xiangning, WENG Hanli. Close-loop control based under-frequency load shedding strategy suitable for isolated power system. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(22): 34-37, 88.
- [10] 马平,蔡兴国,于继来,等. 基于最小不匹配函数的低压减载算法研究.中国电机工程学报,2007,25(1):27-31.
 MA Ping, CAI Xingguo, YU Jilai, et al. A study on a undervoltage load shedding strategy based minimum mismatch function. Proceedings of the CSEE, 2007, 25(1): 27-31.
- [11] 佘庆媛,沈沉,乔颖,等. 电力系统低压减载和低频减载协调控

制策略.电力系统自动化,2008,32(23):23-27.

SHE Qingyuan, SHEN Chen, QIANG Ying, et al. A coordinated load shedding scheme for both under-voltage and under-frequency load shedding. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(23): 23-27.

- [12] MAJID S P. Scrutiny of the Iranian national grid. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(1): 31-39.
- [13] 侯玉强, 敖雄, 顾林. 传统低频低压减负荷判据在现代互联电网 中的适应性研究//2008 年中国电机工程学会年会论文集, 2008 年 11 月 18 日-19 日, 西安, 中国.
- [14] 袁季修. 防御大停电的广域保护和紧急控制. 北京:中国电力出版社,2007.
- [15] 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.
- [16] DL 428—1991 电力系统自动低频减负荷技术规定.北京:中 国电力出版社,2000.
- [17] 韩英铎,闵勇,洪绍斌.复杂扩展式电力系统低频减载方案设计.电力系统自动化,1992,16(1):34-39.
 HAN Yingduo, MIN Yong, HONG Shaobin. Design of large scale multi-machine power system under-frequency load shedding scheme. Automation of Electric Power Systems, 1992, 16(1): 34-39.
- [18] 侯玉强. 受端电网低频低压自动减负荷控制新判据的研究[D]. 南京:国网电力科学研究院,2009.

侯玉强(1983—),男,通信作者,硕士,主要研究方向:电 力系统安全稳定分析与控制。E-mail: houyuqiang@sgepri. sgcc. com. cn

方勇杰(1964—),男,博士,研究员级高级工程师,主要 研究方向:电力系统安全稳定分析与控制。

杨卫东(1967—),男,博士,高级工程师,主要研究方向: 电力系统安全稳定分析与控制。

A New Method of Automatic Load Shedding Control Based on the Voltage and Frequency Dynamics Interaction

HOU Yuqiang, FANG Yongjie, YANG Weidong, BAO Yanhong, XU Taishan, LIU Fusuo, LI Bijun (State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: Traditional under frequency load shedding (UFLS) and under voltage load shedding (UVLS) operate independently using either frequency or voltage measurements without considering the actual voltage and frequency dynamics interaction under various system conditions, load characteristics or contingency scenarios. In some cases, it may cause severe under-control or over-control. This paper presents a new method of automatic load shedding control integrating voltage and frequency dynamics interaction in the device's real-time control algorithm. The key techniques are to measure the voltage, frequency and active load demand at the device installation bus, and to calculate a synthesized state variable for triggering stepwise load shedding operation by taking into account a voltage-frequency interaction under the concerned system operating condition, load characteristics or contingency scenarios. Time domain simulation results of a real power system show that the new method has better adaptability to system operating conditions, load characteristics and contingency scenarios.

This work is supported by the Project of Key Laboratory of Power System Stability Analysis and Control of National Development and Reform Commission (No. [2008] 2012) and State Grid Corporation of China (No. [2008] 1360), and the Project of Multi-agent Technology Based Under Frequency/Under Voltage Load Shedding Control of State Grid Corporation of China.

Key words: under frequency load shedding (UFLS); under voltage load shedding (UVLS); dynamic interaction; voltagefrequency dynamics interaction index; synthesized state variable 附录 A



图 A1 A 电网的地理接线图 Fig.A1 Geography map of power grid A



方式描述	方式1	方式 2	方式 3				
发电机出力 P _G (MW)	2700	2700	2700				
网内总负荷 P _L (MW)	2950	3320	3700				
联络线功率 P _{TL} (MW)	263	633	1003				
P_{TL} / P_L	9%	19%	27%				

表 A1 A 电网的三种运行方式 Table A1 Three different operating conditions of power grid A

表 A2 基于新方法的自动减负荷控制装置各轮次配置方案

 Table A2
 Cycles arrangement scheme of automatic load shedding control devices based on the mentioned method

类型		基本轮 特殊轮				朱轮	
动作整定值/%	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	0.50	0.25
延时/s	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	5.0	10.0
减负荷比例/%	8.0	8.0	8.0	6.0	6.0	3.0	3.0

表 A3 B 电网的减负荷控制装置各轮次配置方案 Table A3 Cycles arrangement scheme of automatic load shedding control devices for power grid B

类型		基本轮 特殊轮				朱轮	
动作值/%	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	0.50	0.25
延时/s	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	5.0	10.0
减负荷比例/%	10.0	10.0	8.0	8.0	8.0	4.0	4.0