低频低压继电器联合减载方法

李 晔[1]，张保会[1]，薄志谦[2]

(1.西安交通大学电气工程学院，陕西 西安 710049；2.国网许继集团，河南 许昌 461000)

摘要：传统的低频低压减载继电器相互独立，减载时未充分考虑负荷特性以及频率电压的相互影响，在严重扰动下可能出现欠控制或者过控制。提出了一种低频低压继电器联合减载方法，该方法在计及负荷母线频率和电压变化对负荷有功功率影响的基础上，根据实时测得的本地负荷的频率与电压响应信息自动计算低压减载量和低频减载的附加减载量，并将所求得低频减载切负荷量与低压减载切负荷量的较大值作为实际切负荷量输出至低频低压继电器上进行逐轮次就地切负荷。IEEE 39 节点系统的仿真结果说明，该方法与传统分散式低频低压减载方法相比，能更好地适应负荷特性和扰动形式的变化，能更有效地保障受扰系统的频率稳定性和电压稳定性。

关键词：频率；电压；负荷特性；切负荷；稳定性

A combined deloading method based on the underfrequency and undervoltage relay

LI Ye[1], ZHANG Baohui[1], BO Zhiqian[2]

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. State Grid XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: Conventional undervoltage load shedding (UVLS) and underfrequency load shedding (UFLS), designed separately without considerations of the load characters and mutual influences of the voltage and the frequency, may result in excessive or insufficient load curtailments. This paper proposes a combined deloading method based on the underfrequency and undervoltage relay. This method uses the real-time measured local responses of the frequency and the voltage to calculate the proportion of UVLS and the accessional proportion of UFLS adaptively with considerations of the influences of frequency and voltage dynamics on the load active power. Furthermore, this method adopts the larger proportion between the proportion of UVLS and UFLS as the practical load shedding proportion, and then transmits the practical load shedding proportion to the underfrequency and undervoltage relay, thus triggering local successive load shedding. Simulation results of IEEE 39-bus system have proved that the new method, compared with the conventional one, can adapt better to load characters and disturbance types, thus protecting the power system from frequency and voltage instabilities more effectively.

Key words: frequency; voltage; load characters; load shedding; stability

中图分类号： TM614 文章编号： 1674-3415(2015)24-0048-07

0 引言

频率稳定和电压稳定是电力系统稳定性的重要内容，已得到国内外的广泛关注[1-4]。低频减载和低压减载作为电力系统安全稳定控制的最后一道防线，对保障受扰系统的频率稳定性和电压稳定性有着至关重要的作用[5-6]。

低频和低压减载主要分为集中式控制方案和分散式控制方案。集中式切负荷控制方案，主要是基于由广域测量系统(WAMS)或能量管理系统(EMS)等获得的系统运行工况数据，通过分析电力系统运行状态，在扰动发生时对预先设定的节点采取切负荷控制[7]。该方案虽然能充分考虑各种工况和多方面因素的影响，但所需信息量大，对信息获取的要求较高[8-12]。

目前我国主要采用的是分散式切负荷控制方案，即低频减载和低压减载继电器相互独立，仅根据本地测得的频率或电压信息进行就地逐轮切负荷[13-14]。该方案所需信息少，简单可靠，但未计及电力系统频率与电压的相互影响，低频减载与低压

减载之间缺乏信息交换，并且切负荷比例固定，在严重扰动下可能造成负荷的过切或者欠切。大量研究表明，充分考虑频率与电压的相互作用，在计及低频低压切负荷控制负效应的基础上，进行分散式低频低压切负荷控制策略的优化和协调，具有重大的理论和实际意义[15-17]。文献[18]在考虑频率与电压交互影响的基础上实时计算综合状态量以触发自动减负荷装置的分轮次动作。文献[19]提出了一种基于多代理技术实现多个就地减负荷控制装置协调动作的新方法以保障系统的频率和电压稳定性。文献[20]在考虑负荷有功功率和电压的基础上，利用分散控制器来实现切负荷。文献[21]运用 GOOSE 传输线路功率，提出了一种实现精确切负荷功能的新方法以满足低频低压减载装置技术升级的要求。

可以看出，学者们对分散式低频低压切负荷控制已经进行了一定的研究，但适应不同节点、不同类型负荷的实际响应特性，在考虑频率与电压响应的基础上进行低频低压切负荷控制的联合整定仍需进一步探究[22]。

另外，传统的低频减载与低压减载独立动作，需要配置两台继电器来分别测量频率和电压，成本较高。若能根据频率与电压的动态响应进行低频低压的联合减载，不仅减少了继电器，简化了整定、维护工作，而且能更准确地进行切负荷。

本文提出一种实测本地响应信息的低频低压继电器联合减载方法，该方法在计及频率和电压变化对负荷有功功率影响的基础上，根据实时测得的本地负荷的频率与电压响应信息自动计算低压减载量和低频减载的附加减载量，从而进行逐次就地切负荷。IEEE 39 节点系统的仿真结果说明，该方法与传统分散式低频低压减载方法相比，能更好地适应负荷特性和扰动形式的变化，能更有效地保障受扰系统的频率稳定性和电压稳定性。

1　负荷的频率电压特性

负荷的有功功率与系统频率和负荷母线电压有关，可以表示为幂函数模型，如式(1)。

$$P_{\mathrm{L}}=P_{\mathrm{L0}}\left(\frac{V}{V_{\mathrm{L0}}}\right)^{\alpha}\times\left(\frac{f}{f_0}\right)^{\beta} \tag{1}$$

式中：P_{L} 为负荷有功功率；P_{L0} 为负荷额定有功功率；V 为负荷母线电压；V_{L0} 为额定负荷电压；f 为系统频率；f_0 为额定频率即 50 Hz；指数 α 取值一般为 0.5~2，指数 β 取值一般为 1.5~6，实际系统中可采用统计综合法、稳态实验法或者在线数据分析法来确定 α 和 β 具体数值[23]。当系统频率和负荷电压发生剧烈变化时，由于负荷的频率电压特性，负荷的有功功率将发生明显改变。

当受扰系统出现频率下降或者电压跌落[24]时，负荷的有功功率将随之减少，此时负荷的频率电压特性将有助于系统频率的恢复和负荷电压的回升，表现为正效应。然而，当扰动较为严重使得系统频率或者电压持续快速跌落时，若触发低频减载或低压减载，则减载后其余负荷的有功功率将随着系统频率或电压的恢复而增加，此时负荷的频率电压特性则表现出对切负荷控制的负效应。因此，在设计低频低压减载方案时，应计及负荷的频率电压特性对低频低压切负荷控制的负效应并根据负荷电压以及系统频率的变化实时地计算切负荷量[25-26]。

2　低频低压继电器联合减载方法

继电器实时采集安装处的母线电压，实时计算频率、电压及其变化率，进而分别估算低频减载与低压减载的切负荷量，并将二者的较大值作为实际切负荷量，触发就地的逐轮次切负荷控制。

2.1 低压减载切负荷量估算

若受扰系统出现并非短路故障造成的负荷电压严重跌落，满足式(2)，而且在此之前该负荷节点未曾实施过减载控制，按照式(3)计算低压减载切负荷量，并无延时地快速切负荷。

$$V_{\mathrm{L0}}-V>0.1\,V_{\mathrm{L0}} \tag{2}$$

式中，V 为实测的负荷母线电压。

$$\Delta P_{\mathrm{LV}}=P_{\mathrm{L}}-P_{\mathrm{L}}\left(\frac{V}{V_{\mathrm{L0}}}\right)^{\alpha}\times\left(\frac{f}{f_0}\right)^{\beta} \tag{3}$$

式中：ΔP_{LV} 为低压减载的切负荷量；P_{L} 为实测的该负荷节点的有功功率；V 和 f 分别为实测的负荷母线电压和频率。由式(3)可知，减载后该负荷节点的实际功率 P_{LS} 应为：

$$P_{\mathrm{LS}}=P_{\mathrm{L}}-\Delta P_{\mathrm{LV}}=P_{\mathrm{L}}\left(\frac{V}{V_{\mathrm{L0}}}\right)^{\alpha}\times\left(\frac{f}{f_0}\right)^{\beta} \tag{4}$$

假设减载前后系统的传输能力不变，即系统能够提供给该负荷节点的有功功率仍为 P_{L}，则经过一定的暂态过程后负荷吸收的功率 P_{LS} 应与系统能够传输的功率 P_{L} 相等，即满足：

$$P_{\mathrm{LS}}=P_{\mathrm{L}} \tag{5}$$

此时，负荷的频率和电压应逐渐恢复到额定值，即 V=V_{L0}，f=f_0。

若该节点已实施了切负荷控制，考虑到负荷电压的恢复需要一定的时间，故在上一次切负荷控制后任意连续的 0.5 s 内，若电压偏移始终大于 10%，并且电压持续跌落或维持不变，即负荷电压 V 满足式(2)和式(6)才按照式(3)进行低压减载切负荷量的计算。

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} \le 0 \qquad t \in (t_{\mathrm{V}}, t_{\mathrm{V}} + 0.5\ \mathrm{s}) \tag{6}$$

式中：t 为时间；t_{V} 为触发该轮低压减载的初始时刻。

2.2 低频减载切负荷量估算

按照系统运行工况和系统容量等事先设定低频减载每一轮门槛值 f_{Kf}、延时 Δt_{f} 以及离线整定的切负荷量 ΔP_{Kf}。若扰动后负荷母线的频率在延时内始终满足式(7)，则触发该轮低频减载。

$$f < f_{K_{\mathrm{f}}} \qquad t \in (t_{\mathrm{f}}, t_{\mathrm{f}} + \Delta t_{\mathrm{f}}) \tag{7}$$

式中：f_{Kf}表示第 K_{f}轮低频减载的门槛值；t_{f}为触发该轮低频减载的初始时刻；Δt_{f}为低频减载每轮的延时。

仅在低频减载首轮动作时，根据实测的负荷母线的频率和电压响应附加切负荷量 ΔP_{1F}。

$$\Delta P_{\mathrm{1F}} = P_{\mathrm{L}} - P_{\mathrm{L}} (\frac{V}{V_{\mathrm{L0}}})^{\alpha} \times (\frac{f_{\mathrm{l}}}{f_0})^{\beta} \tag{8}$$

式中：ΔP_{1F} 为低频减载第一轮的附加减载量；f_{l} 为低频减载第一轮门槛值，即若低频减载第一轮门槛值为 49 Hz，则式(8)中 f_{l}=49 Hz。

2.3 实际切负荷量计算

根据实测的负荷母线的响应信息分别计算出低压减载和低频减载的切负荷量后，为保证低频减载与低压减载的协调控制，按式(9)取低频减载切负荷量和低压减载切负荷量的较大值作为实际的切负荷量，延时 20 ms 后输出至继电器出口，进行逐次切负荷控制。

$$\Delta P_{\mathrm{L}} = \max\{\Delta P_{\mathrm{Lf}},\ \Delta P_{\mathrm{LV}}\} \tag{9}$$

式中：ΔP_{L} 为实际输出的切负荷量；ΔP_{LV} 和 ΔP_{Lf} 分别为低压减载和低频减载的切负荷量。

2.4 切负荷流程

本文低频低压继电器联合减载方法，用图 1 展示切负荷计算流程。

3 算例仿真

为了说明本文的低频低压继电器联合减载方法在各种扰动形式下的适用性，下文利用电力系统分析综合程序(Power System Analysis Software Package，PSASP)在如图 2 所示 IEEE 39 节点系统中仿真计算了本文方法在低频低压、低频、低压三种扰动下的减载效果，并与传统方法进行比较。仿真中考虑调速器和调压器，负荷模型采用式(1)幂函数模型并令式中 α=1，β=1.5。

仿真中采用的传统低频和低压减载方案分别如表 1 和表 2 所示。另外，在本文所提出的低频低压继电器联合减载方案中，令低频减载每轮门槛值以及切负荷量与传统低频减载配置相同。

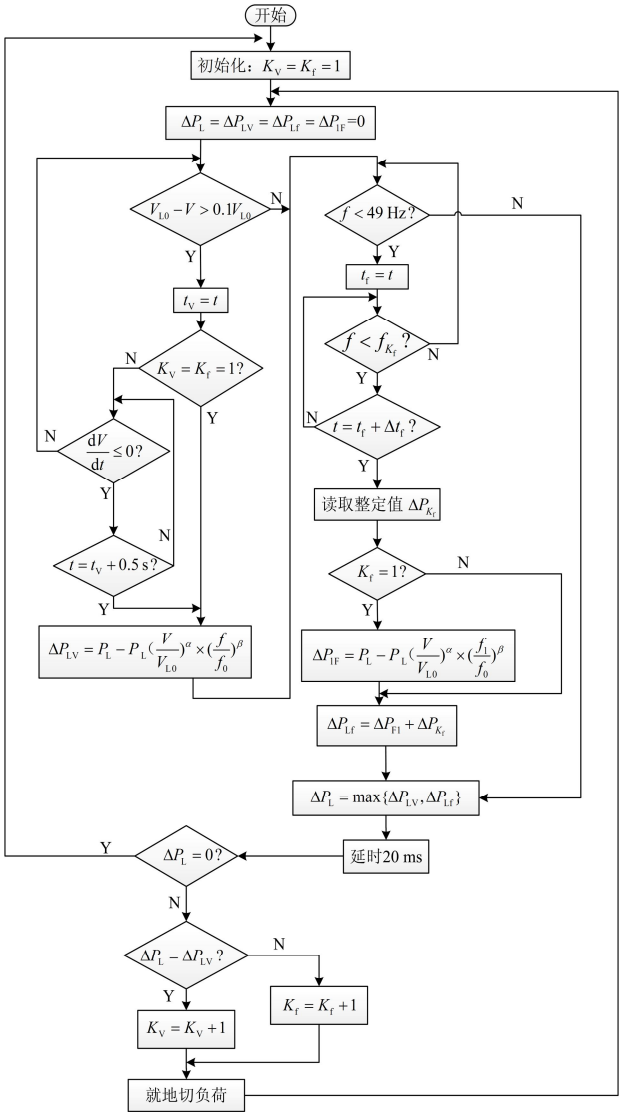

图 1 切负荷流程图

Fig. 1 Flowchart of load shedding

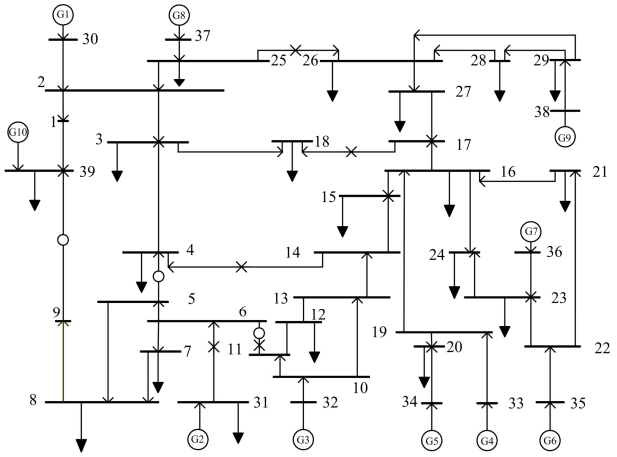

图 2 IEEE 39 节点系统

Fig. 2 IEEE 39-bus system

表 1 传统低频减载方案

Table 1 Conventional UFLS scheme

轮次	动作门槛/Hz	动作延时/s	切负荷量/%
1	49.0	0.2	7
2	48.8	0.2	7
3	48.6	0.2	7
4	48.4	0.2	7
5	48.2	0.2	7
6	48.0	0.2	7
特殊 1	49.0	10.0	5

表 2 传统低压减载方案

Table 2 Conventional UVLS scheme

轮次	动作门槛/pu	动作延时/s	切负荷量/%
1	0.90	0.5	6
2	0.85	0.5	6
3	0.80	0.5	6
4	0.75	0.5	6
5	0.70	0.5	6
6	0.65	0.5	6
特殊 1	0.90	10.0	5

3.1 算例一：低频低压

故障为系统在图 2 所示 X 断面处解列为两个孤网，解列后左侧孤网有功缺额为 1 273.8 MW，占该孤网总有功功率的 71.12%，并且由于受端负荷与机组距离远，在左侧孤网内系统频率和负荷电压将同时发生跌落，使得低频减载和低压减载均被触发。

采用传统方案，低频减载 1~6 轮动作，低压减载 1~2 轮动作，共切除 964 MW 负荷；而采用新方案，低频低压继电器仅动作 5 次，总切负荷量为 1 271 MW。两种方案的减载效果如图 3 和图 4 所示。可以看出，采用传统方案进行减载，继电器动作次数多，并且减载后系统频率悬停在 48.5 Hz 以下，负荷电压恢复较慢；而采用本文新方案进行减载，由于考虑了负荷的频率电压特性多切除了 307 MW 负荷，使得系统频率在扰动后 30 s 内可恢复至 50 Hz，最低负荷电压在扰动后 15 s 内可恢复到额定电压。

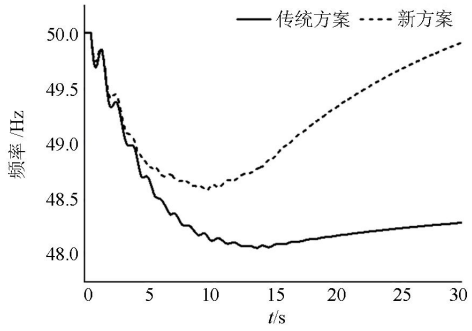

图 3 减载后系统频率

Fig. 3 Frequency after load shedding

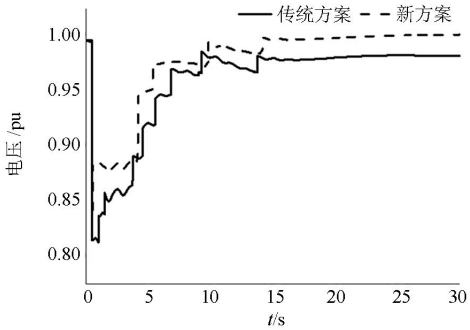

图 4 减载后最低负荷电压

Fig. 4 Lowest load voltage after load shedding

另外，为了验证本文方案对负荷特性的适应性，文中详细仿真了在不同负荷模型下(考虑到负荷电压变化剧烈：令式(1)中 β=1.5，仅改变 α 数值)，本文低频低压切负荷新方法与传统减载方法的差异，结果如表 3 所示。

表 3 减载结果对比

Table 3 Comparison of load shedding results

α	传统减载方案					新减载方案			
	低频减载		低压减载		总切负荷量/MW	低频切负荷量/MW	低压切负荷量/MW	总轮次	总切负荷量/MW
	切负荷量/MW	轮次	切负荷量/MW	轮次					
0.5	784	6	180	2	964	939	189	5	1 128
1.0	784	6	180	2	964	972	299	5	1 271
1.5	784	6	118	2	902	722	380	4	1 102
2.0	784	6	75	1	859	774	447	4	1 221

从表 3 可知，系统解列后，采用传统减载方案，当负荷有功功率与电压有关指数 α 变化时，低频减载的切负荷量和动作轮次没有改变；低压减载的减载量应随着指数 α 的增大而增加，但实际的切负荷量反而减少。然而，采用新方案减载，不仅继电器动作次数少，低压减载量随着 α 的增加而明显增大，

而且从总切负荷量来看，新方案的减载量更接近于孤网的实际有功缺额，能有效地抑制负荷的频率电压特性对切负荷控制造成的负效应。

3.2 算例二：低频

故障为图 2 系统中 35 号发电机和 36 号发电机共损失有功出力 1 098 MW，占全网有功出力的 17.88%。扰动后，负荷电压跌落未超过 10%，但系统频率降至 49 Hz 以下，将触发低频减载。

采用传统低频减载，低频减载 1~2 轮和特殊 1 轮动作，共切除 742 MW 负荷；而采用新的减载方案，继电器仅动作一次，切除负荷 717 MW。图 5 为传统方法与新方法在减载后的频率对比图，可以看出，采用新方法进行低频减载，切负荷量小，而且减载后频率恢复也更快。

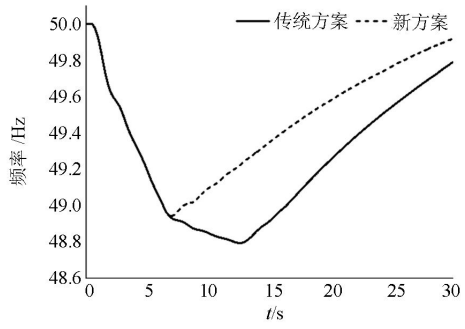

图 5 减载后系统频率

Fig. 5 Frequency after load shedding

3.3 算例三：低压

故障为系统在图 2 所示 O 断面处解列为两部分。解列后，31 号发电机的有功出力基本满足负荷需求，故系统频率维持在额定值 50 Hz 附近，但是负荷母线电压跌落严重，将触发低压减载。

采用传统低压减载并且考虑发电机励磁调节器的作用，则低压减载 1~2 轮动作，共切除 92 MW 负荷；采用传统低压减载但不考虑励磁调节器的作用，则低压减载 1~5 轮和特殊 1 轮动作，共切除 254 MW 负荷；而采用新的减载方案考虑与不考虑发电机励磁调节器的作用，继电器都仅动作一次，切除负荷 241 MW。图 6 为传统方法与新方法在减载后的最低负荷电压对比图，从图中可以看出，采用新方法进行减载，充分考虑了负荷的电压特性，切负荷次数少，减载后负荷电压迅速恢复到额定值，即使励磁调节器无法发挥作用，最低负荷电压也可以保持在 0.96 pu 以上，然而，对于传统低压减载方案，其切负荷次数和切负荷量都受到励磁调节器的影响，当励磁调节器作用受限时，传统低压减载方法不仅切负荷量大、动作轮次多，而且切负荷效果差，负荷电压要经过较长时间才能恢复。

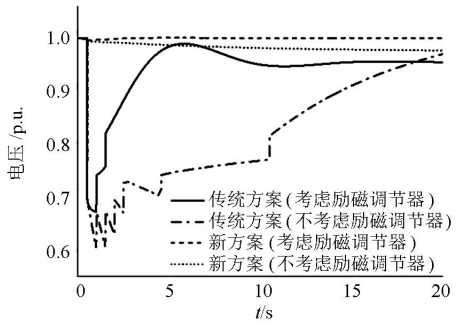

图 6 减载后最低负荷电压

Fig. 6 Lowest load voltage after load shedding

4 结论

本文提出了一种实测本地响应信息的低频低压继电器联合减载方法，该方法在计及负荷母线频率和电压变化对负荷有功功率影响的基础上，根据实时测得的本地负荷的频率与电压响应信息自动计算低压减载量以及低频减载的附加减载量，并将所求得低频减载切负荷量与低压减载切负荷量的较大值作为实际切负荷量进行逐轮次就地切负荷。该方法与传统低频低压减载方法相比，采用的继电器数量少，切负荷动作次数少，减载效果好，能更好地适应负荷特性和扰动形式的变化，能更有效地保障受扰系统的频率稳定性和电压稳定性。

参考文献

[1] 丁涛, 董柏峰, 顾伟, 等. 基于 PMU 的电压稳定动态线性化指标优化切负荷算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 27-33.
DING Tao, DONG Bofeng, GU Wei, et al. Optimization of a load shedding scheme using dynamic voltage stability linearized index based on PMU[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 27-33.

[2] 马兆兴, 李洪美, 万秋兰. 基于动态量测量的电压失稳性判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 30-35.
MA Zhaoxing, LI Hongmei, WAN Qiulan. Study on voltage instability criterion based on dynamic measurement[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 30-35.

[3] 孟建辉, 石新春, 王毅, 等. 改善微电网频率稳定性的分布式逆变电源控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 70-79.
MENG Jianhui, SHI Xinchun, WANG Yi, et al. Control

strategy of DER inverter for improving frequency stability of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 70-79.

[4] 严干贵, 孙兆健, 穆钢, 等. 面向集电系统电压调节的风电场无功电压控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 140-146.
YAN Gangui, SUN Zhaojian, MU Gang, et al. Collector system voltage regulation oriented reactive power control strategy for wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 140-146.

[5] 孙华东, 汤涌, 马世英. 电力系统稳定的定义与分类述评[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 31-35.
SUN Huadong, TANG Yong, MA Shiying. A commentary on definition and classification of power system stability[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 31-35.

[6] 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.

[7] DE LA REE J, CENTENO V, et al. Synchronized. Phasor measurement applications in power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 20-27.

[8] GLAVIC M, THIERRY T V. Wide-area detection of voltage instability from synchronized phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1408-1416.

[9] SEETHALEKSHMI K, SINGH S N, SRIVASTAVA S C. A synchrophasor assisted frequency and voltage stability based load shedding scheme for self-healing of power system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 221-230.

[10] TANG Junjie, LIU Junqi, 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.

[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[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(23): 23-27.
SHE Qingyuan, SHEN Chen, QIAO Ying, et al. A coordinated load shedding scheme for both under-voltage and under-frequency load shedding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(23): 23-27.

[12] 徐泰山, 李碧君, 鲍颜红, 等. 考虑暂态安全性的低频低压减载量的全局优化[J]. 电力系统自动化, 2013, 27(22): 12-15.
XU Taishan, LI Bijun, BAO Yanhong, et al. Optimal parameter-setting of under-frequency and under-voltage load shedding for transient security[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 27(22): 12-15.

[13] 马世英, 易俊, 孙华东, 等. 电力系统低压减载配置原则及方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 45-49.
MA Shiying, YI Jun, SUN Huadong, et al. Principles and schemes of undervoltage load shedding in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(5): 45-49.

[14] 张恒旭, 李常刚, 刘玉田, 等. 电力系统动态频率分析与应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 169-176.
ZHANG Hengxu, LI Changgang, LIU Yutian, et al. Reviews on power system dynamic frequency analysis and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 169-176.

[15] 杨浩, 张保会, 宋云亭, 等. 解列后孤岛频率电压相互作用仿真及机理探讨[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3503-3508.
YANG Hao, ZHANG Baohui, SONG Yunting, et al. Simulation and discussion on mechanism of dynamic interaction between frequency and voltage in islanded power grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3503-3508.

[16] 任先成, 薛禹胜, WU Q H, 等. 低频低压切负荷的控制负效应及其机理[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 1-5, 53.
REN Xiancheng, XUE Yusheng, WU Q H, et al. Negative control effects of UFLS and UVLS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 1-5, 53.

[17] 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 coordination of under frequency/voltage load shedding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 100-107.

[18] 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.

[19] 侯玉强, 方勇杰, 杨卫东, 等. 基于多代理技术的低频低压减负荷控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 1-5, 50.
HOU Yuqiang, FANG Yongjie, YANG Weidong, et al. A new method of UFLS/UVLS based on multi-agent technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 1-5, 50.

[20] OTOMEGA B, CUTSEM T V. Undervoltage load shedding using distributed controllers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1898-1907.

[21] 李祝昆, 宣筱青, 叶振风, 等. 智能变电站架构下的低频低压减载装置技术思路[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(10): 19-22.
LI Zhukun, XUAN Xiaoqing, YE Zhenfeng, et al. Technical ideas of low frequency and low voltage load shedding devices in smart substation architecture[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 19-22 .

[22] 贺仁睦, 韩冬, 杨琳. 负荷模型对电网安全性的影响研究[J]. 电网技术, 2007, 31(5): 1-5.
HE Renmu, HAN Dong, YANG Lin. Study on effect of load models on power system security[J]. Power System Technology, 2007, 31(5): 1-5.

[23] 鞠平. 电力系统负荷建模[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 52-72.

[24] 陈众励, 许维胜. 电压中断与电压暂降的成因及其防治[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 518-520.
CHEN Zhongli, XU Weisheng. Reason and prevention of voltage interruption and voltage sags[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 518-520.

[25] 黄小庆, 曹阳, 吴卫良, 等. 考虑电压暂降指标的电压协调控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 147-154.
HUANG Xiaoqing, CAO Yang, WU Weiliang, et al. Research on voltage coordination control method considering voltage sag index[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 147-154.

[26] 毛涛, 乐健, 黄银龙, 等. 基于实时监测数据校验的配电系统电压跌落仿真系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 122-127.
MAO Tao, LE Jian, HUANG Yinlong, et al. Research on simulation system of voltage sag in distribution system based on real-time monitoring data verification[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 122-127.

收稿日期：2015-03-03

作者简介：

李 晔(1990-)，男，硕士研究生，主要研究方向为电力系统频率与电压稳定性分析与控制; E-mail: ly.lycc@stu.xjtu.edu.cn

张保会(1953-)，男，教授，博士生导师，主要从事电力系统安全稳定控制、继电保护和电力线通信等领域的教学、科研工作; E-mail: bhzhang@mail.xjtu.edu.cn

薄志谦(1955-)，男，博士，教授，主要研究方向为电力系统保护与控制。

(编辑 周金梅)