

解列后孤岛电网电压失稳机理探讨

陆勇¹, 张文朝¹, 张祥成², 赵红光¹, 张博², 潘艳¹

(1. 南京南瑞集团公司北京监控技术中心, 北京 100220; 2. 国网青海省电力公司, 青海 西宁 810008)

摘要: 电网因故障解列后由于功率缺额孤岛频率一般会下降, 而实际电网事故中存在解列后功率缺额情况下孤岛电压失稳且伴随频率上升的现象。利用负荷功率与基本电气量的关系探究网络视在功率传输极限, 并从理论上分析电压稳定的静态运行点。通过仿真算例从孤岛网络、负荷电压-功率特性两方面对解列后孤岛电网电压失稳机理进行研究, 分析指出解列后负荷视在功率接近网络的视在功率传输极限时, 网络极限会制约负荷功率的增长。进一步从各时间断面的视在功率传输极限的角度出发, 分析网络极限与马达负荷的制约机理, 指出短路故障后马达吸收无功是造成孤岛电压失稳的重要诱因, 从而揭示电压失稳后低负荷电磁功率是孤岛低压高频的本质。研究成果可为孤岛电网运行方式安排以及集中切负荷、低压减载措施提供参考。

关键词: 孤岛电网; 静态运行点; 电压失稳; 负荷电压-功率特性; 视在功率传输极限

Study on mechanisms of voltage instability in islanding grid after fault disconnection

LU Yong¹, ZHANG Wenchao¹, ZHANG Xiangcheng², ZHAO Hongguang¹, ZHANG Bo², PAN Yan¹

(1. Beijing Monitoring Technology Center of NARI Group Corporation, Beijing 100220, China;

2. State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, China)

Abstract: Under normal circumstances, the frequency of islanding grid will drop because of power shortage after fault disconnection. However, voltage instability happened with increasing frequency under condition of large power shortage in practical power grid accidents. This paper uses the relationship between load power and basic electrical variables to research the transfer limits of apparent power and to analyze static operation point. And then voltage instability mechanism of the islanding grid after fault disconnection is analyzed from aspect of grid frame and voltage-power characteristic with simulation model. It is pointed out that load capacity will be limited if the load apparent power is close to transfer limit of islanding grid. Furthermore, restrictive mechanism between grid limit and motor load is analyzed by aspect of transfer limit of apparent power at each time section and to point out that reactive power of motor absorbed after short fault is an important cause of islanding voltage instability. And then it reveals that low electromagnetic power after voltage instability is the essential reason of low-voltage with high-frequency question. It provides reference for the operation mode arrangement of islanding grid and control of concentrated load shedding and under-voltage load shedding.

Key words: islanding grid; static operation point; voltage instability; voltage-power characteristic of load; transfer limit of apparent power

0 引言

电力系统中有些地区电网与主网联系薄弱, 一旦发生联络元件故障跳闸, 地区电网与主网解列并形成孤岛电网^[1-2]。一般按照功率盈缺情况可以将孤岛频率变化趋势划分为两类: 功率盈余时孤岛频率上升, 功率缺额时孤岛频率下降。前者在功率盈余过大时存在高频问题, 一般需要采取切机措施; 后者功率缺额越大, 孤岛频率下降越明显, 一般需要

根据功率缺额量和频率变化情况采取减载措施^[3-4]。两类情况的盈缺功率临界值与孤岛的电源构成、机组出力、一次调频特性、负荷特性密切相关^[5-6]。

然而, 实际电网事故中存在大功率缺额下的电压跌落, 并伴随高频现象, Taylor 在研究孤岛的低频减载时发现孤岛电压失稳时电压衰减比频率衰减快, 电压灵敏性负荷会使系统频率衰减缓慢甚至上升^[7]。近年来, 有学者对低压高频问题做出探索, 文献^[8]首次披露了暂态频率和电压安全控制的负

效应现象的机理,指出切负荷带来电压频率恢复正效应的同时伴随负效应,即切负荷后电压恢复使得剩余负荷吸收的功率增加。文献[9]在孤岛频率、电压耦合作用的基础上,深入分析孤岛负荷的功率特性对频率变化的影响,进一步提出孤岛高频与电压失稳有重要联系,而并未对孤岛电压失稳机理进行探讨。近年电压稳定研究中,文献[10]指出不同负荷在系统特性曲线下半支的稳定情况由负荷静特性决定。文献[11]也分别对电压稳定机理给予一定解释。上述文献都没有针对网络的视在功率传输极限与马达暂态过程相互制约下的孤岛电压失稳机理进行详尽研究。由于孤岛电压失稳在机理及动态特征上的差别会导致低压减载方案各异,不同方案对孤岛安全稳定影响也存在差异,有的甚至会恶化孤岛稳定性,因此对孤岛电压失稳机理探讨具有重要意义^[12]。

本文从视在功率传输的基本原理出发,首先在理论上分析网络视在功率传输极限的内在影响因素,再通过模型仿真对解列后孤岛电压失稳机理进行研究,进而从本质上指出孤岛网络与马达负荷电压-功率特性的相互制约关系。该机理分析可为孤岛电网的运行方式安排以及集中切负荷、低压减载等联控策略提供参考。

1 解列后孤岛电网电压、频率变化分析

某地区电网与主网仅通过双回线路联系,一回线路检修另一回跳闸后该地区成为孤岛。利用PSD-BPA以该地区电网的实际数据为基础搭建离线仿真模型,其中负荷采用60%马达+40%恒阻抗负荷模型。离线仿真中,不同的受电比例情况下,解列后孤岛电网的电压和频率变化曲线如图1所示。其中,受电比例用式(1)表示。

$$\text{受电比例} = \frac{\text{负荷有功功率} - \text{孤岛发电机有功出力}}{\text{负荷有功功率}} \times 100\% \quad (1)$$

由图1可知,地区电网受电16%时,解列后孤岛电压可以恢复稳定,而频率持续下降直至失稳。而受电39%时,解列后孤岛电压不能恢复,此时频率却存在上升现象。解列后若出现大功率缺额导致的低压高频场景,则低周减载装置无法动作,高周切机会加剧电压跌落,集中切负荷虽可以起到一定作用,但若切负荷的时间不够快也难以解决问题。因此,常规电压、频率控制策略难以满足此场景下的孤岛稳定要求。需要进一步探究此场景下电压失稳机理,为孤岛安全稳定控制提供参考。

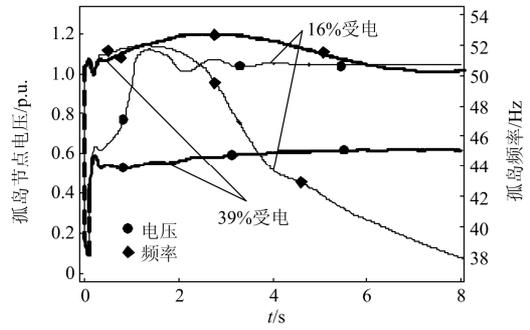


图1 解列故障后孤岛电压、频率变化曲线

Fig. 1 Curve of voltage and frequency change after fault disconnection

2 基于视在功率的静态运行点研究

电压稳定静态分析的本质是潮流方程是否存在可行解,任何存在静态运行点的工况都需要满足有功、无功平衡关系,而有功、无功的传输会受到网络的约束^[13]。解列后孤岛负荷仅由内部发电机供电,两者间网络联系会影响视在功率的传输能力。为简化孤岛电压稳定分析,先通过单机负荷模型探究视在功率的传输特性,等效模型如图2所示^[14]。

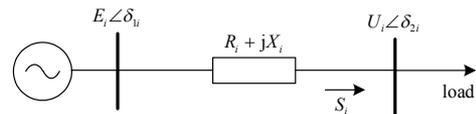


图2 单机负荷等效模型

Fig. 2 Equivalent model of generator-load

图2中 E_i 、 δ_{i1} 表示负荷外侧等效电压和相角, U_i 、 δ_{2i} 表示负荷电压和相角, $R_i + jX_i$ 表示负荷外侧的等效阻抗, S_i 表示注入负荷的视在功率, i 表示负荷节点。

根据电网络理论可得注入负荷的有功、无功表达式为

$$P_i = \frac{E_i U_i}{\sqrt{R_i^2 + X_i^2}} \cos(\theta_i - \delta_{i1} + \delta_{2i}) - \frac{U_i^2}{\sqrt{R_i^2 + X_i^2}} \cos \theta_i$$

$$Q_i = \frac{E_i U_i}{\sqrt{R_i^2 + X_i^2}} \sin(\theta_i - \delta_{i1} + \delta_{2i}) - \frac{U_i^2}{\sqrt{R_i^2 + X_i^2}} \sin \theta_i \quad (2)$$

式(2)中: θ_i 为负荷外侧等效阻抗角; P_i 与 Q_i 分别为注入负荷的有功和无功。将 δ_{i1} 、 δ_{2i} 消去可得到 S_i 、 E_i 、 U_i 、 R_i 、 X_i 、 φ_i 的关系式如式(3),其中 φ_i 表示负荷功率因数角。

$$\left(\frac{U_i^2}{\sqrt{R_i^2 + X_i^2}}\right)^2 + (2S_i \cos(\theta_i - \varphi_i) - \frac{E_i^2}{\sqrt{R_i^2 + X_i^2}}) \frac{U_i^2}{\sqrt{R_i^2 + X_i^2}} + S_i^2 = 0 \quad (3)$$

电网任意稳态运行的工况下, 注入负荷的视在功率与各电气量的关系都应满足式(3), 通过式(3)可得到负荷节点电压平方的表达式为

$$U_i^2 = \frac{E_i^2}{2} - S_i \sqrt{R_i^2 + X_i^2} \cos(\theta_i - \varphi_i) \pm \frac{\sqrt{(2S_i \sqrt{R_i^2 + X_i^2} \cos(\theta_i - \varphi_i) - E_i^2)^2 - 4(R_i^2 + X_i^2)S_i^2}}{2} \quad (4)$$

若系统存在静态运行点, 则上述方程必然有解, 即需要满足:

$$(2S_i \sqrt{R_i^2 + X_i^2} \cos(\theta_i - \varphi_i) - E_i^2)^2 \leq 4(R_i^2 + X_i^2)S_i^2 \quad (5)$$

整理后可得网络的视在功率传输极限, 由于视在功率可以综合有功、无功交互影响, 该极限值具有清晰的物理意义。

$$S_{\max} = \frac{E_i^2}{2\sqrt{R_i^2 + X_i^2} [1 + \cos(\theta_i - \varphi_i)]} \quad (6)$$

由式(6)可知, 网络的视在功率传输极限与负荷外侧等效阻抗以及负荷功率因数密切相关, 稳态运行中若负荷功率值大于极限值则式(4)没有电压解而不存在静态运行点, 直接导致电压失稳。此外, 负荷功率因数的变化也会对网络的视在功率传输极限带来影响。本文将通过孤岛网络变化和负荷电压-功率特性两方面探讨解列故障后孤岛电压失稳机理。

3 孤岛电网视在功率传输极限分析

本文用 PSD-BPA 机电暂态仿真软件构建孤岛电网模型, 功率基准值为 100 MVA, 示意图如图 3 所示。

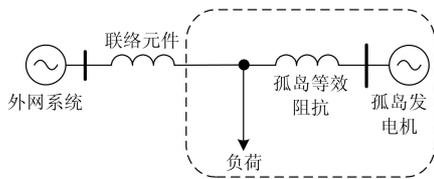


图 3 主网与孤岛电网的简化模型

Fig. 3 Simplified model between main grid and islanding grid

图 3 中联络元件跳闸后方框部分即形成孤岛, 用孤岛等效阻抗来表征发电机与负荷间的电气联

系, 为简化分析, 文中忽略等效阻抗中的电阻。

不同的孤岛等效阻抗下, 对比 250+j125 MVA 负荷解列后的电压变化情况, 负荷模型确定为恒功率模型, 负荷功率因数为 0.9, 对比情形如表 1 所示。

表 1 不同孤岛等效阻抗变化对比

Table 1 Comparison of different equivalent impedance in islanding grid

组别	负荷视在功率/p.u.	孤岛等效阻抗/p.u.	解列前负荷电压/p.u.	孤岛的视在功率传输极限/p.u.
1	2.80	j0.086	0.984	4.04
2	2.80	j0.105	0.983	3.31
3	2.80	j0.126	0.982	2.76

解列后, 不同孤岛等效阻抗下的电压变化曲线如图 4 所示, 孤岛的视在功率传输极限如表 4 所示。对比发现, 发电机与负荷电气联系越弱时(孤岛等效阻抗越大), 网络的视在功率传输极限越低。等效阻抗为 j0.126 时解列后孤岛负荷视在功率大于其视在功率传输极限, 直接引发电压失稳, 此等效阻抗的负荷电压及电压变化率(dv/ds)相对于视在功率的变化曲线如图 5 所示。

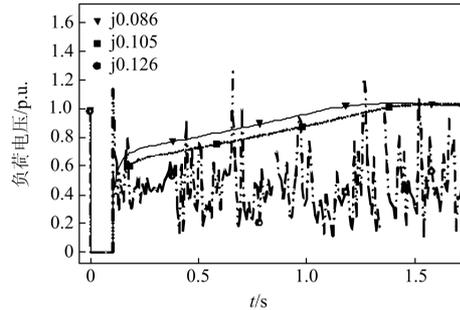


图 4 不同孤岛等效阻抗下解列后电压变化曲线
Fig. 4 Curve of voltage change in different islanding equivalent impedance after disconnection

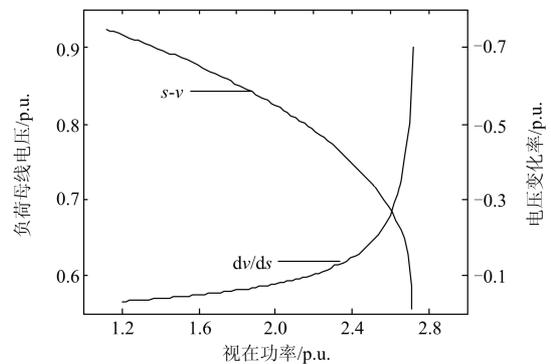


图 5 孤岛负荷电压及其变化率随视在功率变化曲线
Fig. 5 Curve of load voltage and voltage change rate with apparent power after disconnection

由图 5 可知,当负荷功率接近功率传输极限时,负荷功率的微小增量会导致负荷电压的大幅度跌落,此时网络对负荷功率的增长有明显的制约。因此,孤岛电网的视在功率传输极限是制约解列前负荷水平的重要因素,孤岛电网负荷与发电机电气联系越弱,极限越低,解列后越容易引发电压失稳。

4 负荷电压-功率特性对孤岛电压稳定影响

4.1 短路冲击对马达电压-功率特性影响

利用数学表达式近似反映负荷功率随系统电压、频率变化而相应变化的特性称为负荷特性,其中负荷电压-功率特性在孤岛电压稳定中起到重要作用^[15]。电力系统中存在大量马达负荷,若不考虑马达端电压变化,在马达参数确定情况下滑差增大会使得无功需求持续增大,滑差接近 1 时马达堵转;实际系统中马达负荷能够从系统得到的视在功率在暂态过程中随端电压的变化而不断变化,短路故障后的电压-功率特性使得马达暂态过程变得复杂。

马达转子运动方程如式(7)所示, T_j 表示马达转动惯量, T_m 表示马达负荷机械转矩, T_e 表示马达电磁转矩^[16-17]。

$$T_j \frac{ds}{dt} = T_m - T_e \quad (7)$$

仿真中负荷采用 60%马达+40%恒阻抗模型,马达采用三阶机电暂态模型的典型参数,发电机采用 $E_{q'}$ 恒定模型,不同负荷水平下短路故障解列后马达负荷的有功、无功、滑差、电压变化如图 6 所示。

对比可见,在 250+j125 MVA 负荷水平下,因短路故障解列后的电压可以恢复到 0.78 p.u,马达滑差增大到 0.047 后持续减小直至稳定,马达有功功率先增大后减小直至稳定在 150 MW;而 290+j145 MVA 负荷水平下,短路故障解列后的滑差持续增加,电压达到最大值后持续跌落,直至马达堵转。该过程中,马达无功功率从 0.25 s 开始持续增加,而有功功率从 0.25 s 开始持续减小。负荷越重,电压跌落越低,滑差和无功功率增加速度越快,有功衰减速度越快。

结合式(7)可知,短路期间马达负荷的机械转矩使马达减速,造成滑差加大。若该转矩越大,则短路期间滑差增大越多,当短路故障切除后滑差不能恢复至原有较小滑差,则直接引发无功需求过大导致电压失稳。同时,短路期间增大的滑差会使得故障切除后的无功需求大于正常水平,这也造成电压难以恢复。可见,短路冲击后转矩差造成的滑差变化会进一步带动无功需求变化并影响电压恢复,这是孤岛电压失稳的重要诱因。

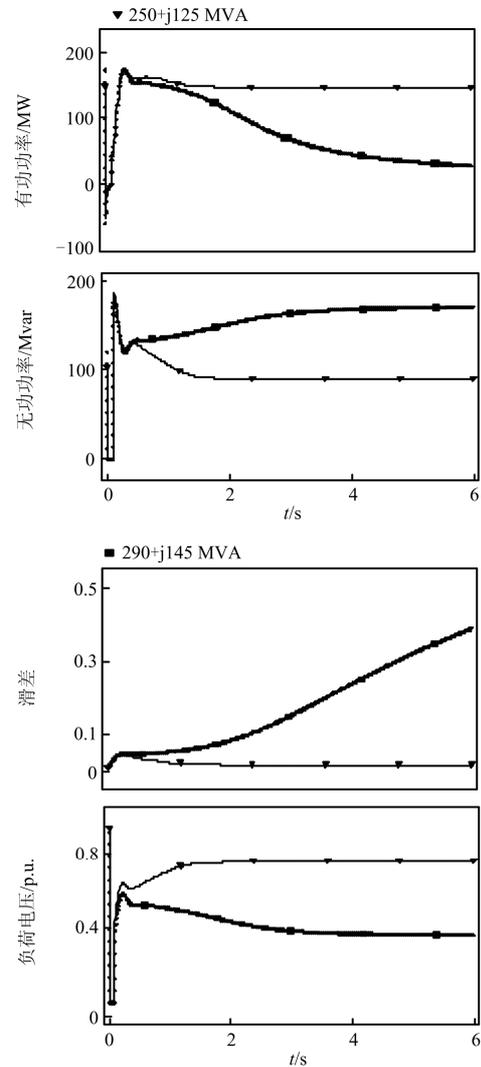


图 6 短路故障解列后马达功率、滑差、电压变化曲线

Fig. 6 Curve of power, slip, load voltage of motor load after fault disconnection

4.2 网络约束对马达电压-功率特性影响

根据 4.1 节内容可知,短路冲击会使得故障切除后无功需求增大,对比其中 290+j145 MVA 负荷在无故障解列和短路故障解列情况的马达负荷无功功率变化情况,如图 7 所示。

结合式(6)可知,在孤岛自身网架不变的情况下,若发电机端电压近似保持不变,此时孤岛电网的视在功率传输极限仅与负荷功率因数相关。而通过图 7 可见,短路冲击后马达负荷吸收了大量无功功率,这将降低整体负荷的功率因数。现根据各时间断面的负荷功率因数求得此刻对应的视在功率传输极限,不同故障下的负荷功率因数与视在功率传输极限变化情况如图 8。

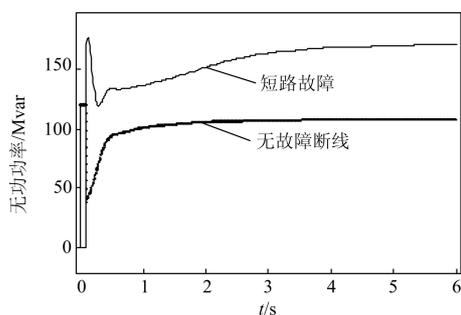


图7 不同故障形式马达无功功率变化

Fig. 7 Reactive power change of motor in different fault

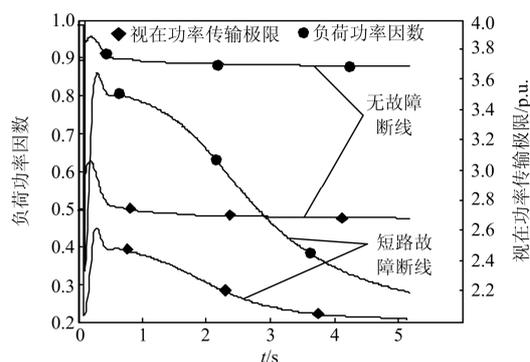


图8 负荷功率因数与视在功率传输极限变化

Fig. 8 Change of load power factor and limit of apparent power

如图8所示, 短路故障切除后的负荷功率因数低于无故障断线的负荷功率因数, 孤岛电压失稳后, 负荷功率因数和网络的视在功率传输极限严重下降。

分析可知, 短路故障切除后, 马达吸收大量无功功率降低负荷功率因数, 进而使该时间断面的视在功率传输极限降低。马达功率恢复期间其视在功率逼近视在功率传输极限, 在接近极限状态下, 视在功率略微增长会使电压迅速下降。而马达有功功率与其端电压正相关, 这使得功率增长与电压恢复形成制约关系以至于其有功功率难以增长。而此时马达负荷的机械转矩并无较大变化, 若有功率不能继续恢复, 存在的较大转矩差将进一步增大滑差, 同时马达负荷的无功功率增加, 这将进一步恶化电压跌落进而使得有功功率降低, 如此形成一种正反馈, 直至马达堵转以致电压失稳, 电压失稳后有功功率也迅速下降。若负荷机械转矩越大, 则失稳进程将越快。

因此, 对于因短路故障解列后的孤岛马达负荷而言, 若解列前有功负荷越大, 则解列后的机械转矩越大, 在短路中滑差增大越多, 越容易引发电压失稳。其实质在于, 故障切除后马达吸收无功功率

降低负荷功率因数而降低各时间断面的视在功率传输稳定极限, 从而使得功率恢复与电压恢复互相制约, 在机械转矩作用下滑差与无功持续增大引发电压失稳。若马达堵转后不及时切除, 也会引起系统的电压失稳。

5 结论

本文从理论上分析静态运行点后, 指出解列后孤岛负荷视在功率大于孤岛网络的视在功率传输极限则不存在静态运行点而引发电压失稳。对网络与马达电压-功率特性分析, 指出短路后马达吸收无功会降低负荷功率因数, 从而降低网络传输视在功率的能力, 在逼近极限情况下马达有功恢复与电压恢复形成制约关系, 最终使得滑差和无功增加以至马达堵转、电压失稳。本文揭示了孤岛网络与马达负荷相互制约的机理, 从而指出电压失稳造成的低负荷电磁功率是孤岛低压高频现象的本质, 对预防孤岛低压高频现象的发生和制定集中切负荷、低压减载等措施具有一定价值。

参考文献

- [1] 李少林, 王瑞明, 孙勇, 等. 分散式风电孤岛运行特性与孤岛检测试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 13-19.
LI Shaolin, WANG Ruiming, SUN Yong, et al. Analysis and experiment research on islanding behaviors and detection strategy for dispersed wind power[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 13-19.
- [2] 王旭东, 林济铿, 李胜文, 等. 电力孤岛划分研究综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 125-135.
WANG Xudong, LIN Jikeng, LI Shengwen, et al. Review of research on island partitioning in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 125-135.
- [3] 王君, 王晓茹, 谢大鹏, 等. 孤岛系统的低频减载方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 29-33.
WANG Jun, WANG Xiaoru, XIE Dapeng, et al. Investigation of under frequency load shedding on an isolated system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 29-33.
- [4] 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.

- [5] 陈树勇, 朱琳, 丁剑, 等. 风电场并网对孤网高频切机的影响研究[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 58-64.
CHEN Shuyong, ZHU Lin, DING Jian, et al. Impact of grid-connected wind farms on high frequency generator tripping in isolated power grid[J]. Power System Technology, 2010, 36(1): 58-64.
- [6] 王一振, 马世英, 王青, 等. 电力系统孤网高频问题研究现状和发展趋势[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 165-169.
WANG Yizhen, MA Shiyong, WANG Qing, et al. Present status and developing trend of research on over frequency in isolated power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 165-169.
- [7] TAYLOR C W. Power system voltage stability[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 12-28.
- [8] 任先成, 薛禹胜, 丁明, 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.
REN Xiancheng, XUE Yusheng, DING Ming, et al. Negative control effects of UFLS and UVLS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 1-5.
- [9] 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.
- [10] 郑圆, 袁荣湘, 刘海洋, 等. 对中长期电压失稳机理的定性探讨[J]. 高电压技术, 2006, 32(8): 93-96.
ZHENG Yuan, YUAN Rongxiang, LIU Haiyang, et al. Conceptual analysis on the mechanism of mid and longer-term voltage instability[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(8): 93-96.
- [11] 廖怀庆. 电力系统电压稳定机理及其应用探究[J]. 华东电力, 2008, 36(10): 39-43.
LIAO Huaiqing. Study on power system voltage stability analysis and application[J]. East China Electric Power, 2008, 36(10): 39-43.
- [12] 刘蔚, 赵勇, 苏寅生, 等. 电力系统低压减载配置和整定方法综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 36-43.
LIU Wei, ZHAO Yong, SU Yinsheng, et al. Review on configuration and setting methods of under voltage load shedding of power systems[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 36-43.
- [13] 汤涌. 电力系统电压稳定分析[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [14] 王梅义, 吴竞昌, 蒙定中. 大电网系统技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [15] 彭志炜, 胡国根, 韩祯祥. 应用分叉理论研究负荷特性对电力系统电压稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 408-411.
PENG Zhiwei, HU Guogen, HAN Zhenxiang. The feature selection and location of short-circuit for tree-type distribution line[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(6): 408-411.
- [16] 李佳, 刘天琪, 李兴源, 等. 感应电动机模型和机械转矩参数对暂态电压稳定评估的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 19-24.
LI Jia, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Influence on assessment of transient voltage stability by induction motor model and mechanical torque parameters[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 19-24.
- [17] 宋帅, 张英敏, 李兴源. 考虑感应电动机故障中电磁转矩变化的节点暂态电压评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 103-108.
SONG Shuai, ZHANG Yingmin, LI Xingyuan. Assessment method of transient voltage stability of load bus considering the changing of induction motor electromagnetic torque in fault[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 103-108.

收稿日期: 2015-07-21; 修回日期: 2015-10-11

作者简介:

陆勇(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电压稳定、电力系统分析与控制; E-mail: ylu2013@163.com

张文朝(1978-), 男, 高级工程师, 硕导, 从事电力系统稳定分析、电力系统运行与控制等方面的科研工作。E-mail: zwenchao72@126.com

(编辑 周金梅)