



暂态稳定性<sup>[6-8]</sup>。现有切负荷控制离线策略表一般基于典型运行方式,对各种故障进行离线仿真分析,当断面功率大于设定阈值时切除相应的负荷量<sup>[9]</sup>。但对于大规模光伏接入的局部电网来说,若仅以断面功率为稳控动作门槛,不分析光伏接入后系统电压稳定特性,有可能出现光伏接入容量较大使得交流断面受电功率较小,当小于设定稳控动作门槛时仍出现电压失稳的现象。即光伏大发或断面功率过大均有可能导致交流故障后电压失稳,需要区分电压失稳主导因素,避免仅通过断面功率小于设定门槛而忽略光伏接入导致的故障下电压失稳、以及紧急控制措施失配情况。文献[10]以大扰动后系统各负荷节点电压跌落幅值为判据,进行切负荷地点的选择。文献[11]研究了通过单点与外网连接的区域电网静态电压稳定性,制定了广域切负荷控制方法。但上述方法均未涉及光伏接入后系统电压稳定性变化,且仅从静态或暂态电压稳定性变化角度构建切负荷量化指标,降低了切负荷控制策略的适应性。

为了提高大规模光伏接入电网后紧急切负荷控制方法对于不同电压失稳主导因素的适应性,避免以往仅依据断面功率大于门槛值才采取紧急控制,而对故障后高压电网电压恢复产生不利影响,本文深入分析了暂态电压安全稳定紧急控制存在拐点的机理,以故障后光伏汇集站吸收无功功率变化识别电压失稳主导因素,制定了失稳因素为光伏主导和断面主导的切负荷控制策略,实现了对电压薄弱环节切负荷量化控制。

## 1 高渗透率光伏接入电网暂态电压失配风险

### 1.1 光伏并网系统无功电压特性

光伏发电系统其整体结构如图1所示。主要包括光伏阵列和逆变器两部分,并网逆变器是通过控制输出电流的幅值、频率和相位三要素参量,跟踪并网电压来实现并网和功率输出<sup>[12]</sup>。

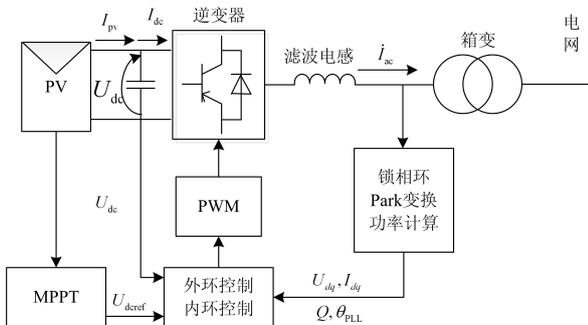


图1 光伏发电系统典型框图

Fig. 1 Typical block diagram of PV system

将箱变及馈电线路等值为单台升压变,站内各升压变励磁绕组等值为单台升压变励磁绕组,站内升压变绕组损耗及线路损耗等值为单台升压变绕组损耗,建立光伏电站等值模型如图2所示。

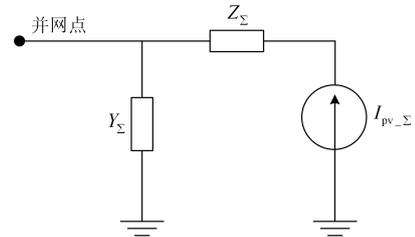


图2 光伏电站等值模型

Fig. 2 Equivalent model of PV power station

等值模型参数计算<sup>[13]</sup>:

$$I_{pv\_Σ} = \sum I_{ac(j)} \quad (1)$$

$$P_{CuΣ} = \sum P_{Cu(j)} + \sum R_{(k)} \cdot \left( \frac{P_{(k)}}{U_N} \right)^2 \cdot 1000 \quad (2)$$

$$Q_{LΣ} = \sum X_{(k)} \cdot \left( \frac{P_{(k)}}{U_N} \right)^2 \cdot 10^{-3} - \sum B_{(k)} \cdot U_N^2 \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

式中:电流源模型容量 $I_{pv\_Σ}$ 为光伏电站内逆变器输出电流之和;等值升压变的短路损耗 $P_{CuΣ}$ (MW)为各单元等值升压变短路损耗 $P_{Cu(j)}$ (MW)与站内馈线输送电能有功损耗 $\sum R_{(k)} \cdot \left( \frac{P_{(k)}}{U_N} \right)^2 \cdot 1000$ (MW)之和,其中 $R_{(k)}$ 为站内馈线电阻, $P_{(k)}$ 为站内馈线输送有功, $U_N$ (kV)为光伏并网点电压;线路总无功损耗 $Q_{LΣ}$ (Mvar)为站内升压变的绕组损耗及线路损耗; $X_{(k)}$ 、 $B_{(k)}$ 分别为站内升压变绕组电抗及线路等值电纳。

随着并网点扰动下电压的降低,光伏发电单元通过内外环控制增加 $I_{pv\_Σ}$ ,使得光伏汇集站送出线路有功功率波动尽可能小;但 $U_N$ 降低时升压变短路损耗和线路总无功损耗却呈平方增大,且光伏出力越大、汇集站出线阻抗(电气距离)越大,从汇集站看进去的交流系统吸收无功功率也越大,严重影响交流系统暂态电压稳定。

以黄河乌兰50 MW光伏电站实测曲线为例说明交流故障后光伏并网系统的无功电压特性,当发生单相瞬时短路故障后,光伏电站并网点电压、输出有功功率和无功功率如图3所示,与上文分析结果一致。

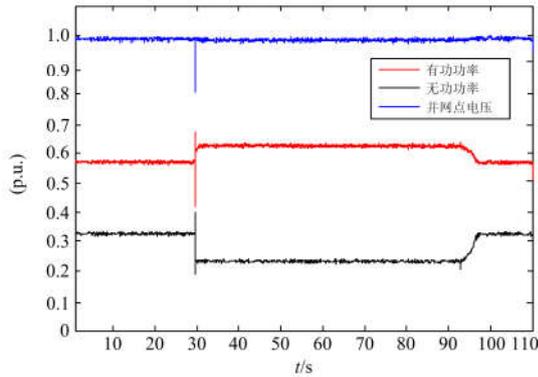


图3 故障下光伏并网点实测波形

Fig. 3 Measured waveform of PV parallel point with power

### 1.2 光伏并网系统暂态电压稳定拐点机理

对于不含光伏接入系统而言,局部电网通过交流断面送/受电,当发生交流线路故障后,电网暂态电压失稳主要是由于故障后存在大量有功功率和无功功率转移,特别是无功功率传递增加,使得联络断面电压跌落,而网内感应电动机在恢复过程中吸收无功功率增加,加剧了电压失稳风险<sup>[14]</sup>。一般而言,联络断面功率越大,相同交流故障下暂态电压裕度越低,系统安全稳定裕度呈单调下降趋势,如图4(a)所示。

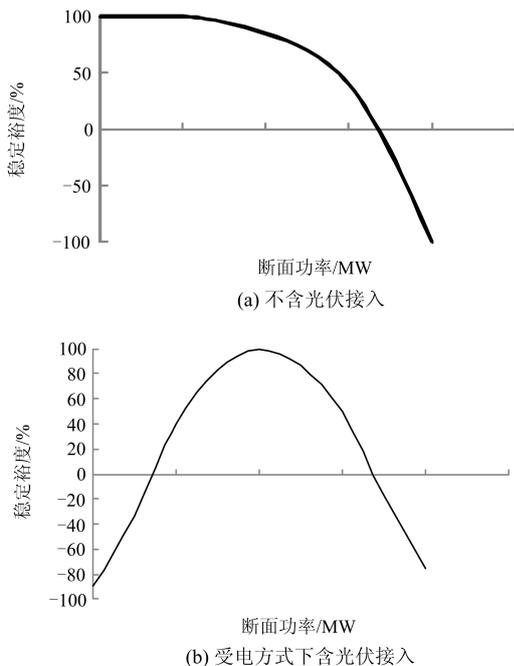


图4 暂态电压稳定裕度随交流断面功率变化曲线

Fig. 4 Curve of transient voltage stability margin change with AC transmission section power

但通过 1.1 节分析可知,光伏大量接入会使系统暂态电压稳定特性恶化,分为:

#### (1) 局部电网受电方式

少量增加区域内光伏使得交流断面受电功率减小,交流故障后潮流转移导致无功功率转移降低,有利于暂态电压稳定。大规模增加光伏使得交流断面受电功率大大减少,潮流转移导致无功功率转移电压失稳因素不明显,但光伏的等效导纳增加,使得暂态过程中电压恶化效果急剧增加,占电压失稳主导因素。相同交流故障下系统安全稳定裕度不再随断面功率减小而单调增大,存在电压失稳拐点,整体曲线呈下开口抛物线,如图4(b)所示。

#### (2) 局部电网送电方式

光伏继续大发,局部电网呈现功率外送趋势,交流故障后潮流转移及光伏恶化电压的作用叠加,使得系统暂态安全稳定裕度急剧降低。当本地无功电压支撑能力严重不足(无火电、动态无功补偿等),故障后切负荷甚至切光伏机组均可能无法使母线电压恢复稳定<sup>[15]</sup>。

## 2 含光伏接入系统电压薄弱负荷节点

由于电压失稳是一个较缓慢的过程,常常要仿真到几分钟甚至几十分钟,且仿真模型中的时间常数差别很大,混合着快速和慢速动态过程,是典型的刚性非线性系统。因此可考虑将所研究的局部电网对外戴维南等值,通过时域仿真计算不同方式故障后系统暂态电压安全稳定裕度 $\eta_v$ ,若暂态电压安全稳定裕度小于某一门槛 $\varepsilon$ ,判定电压失稳,需要采取切负荷等紧急控制措施<sup>[16-17]</sup>。

对于切负荷控制措施而言,一般选取系统电压稳定性较差节点,即电压薄弱负荷节点进行切除,以提高控制后系统静态电压安全稳定裕度。由于局部系统模型是在外部网络戴维南等值的基础上建立的,可通过负荷节点内阻抗与对外戴维南等值阻抗比值判断,根据戴维南等值定理,该比值越小,对应负荷节点的静态电压稳定性越好<sup>[18]</sup>。因此,在执行切负荷控制措施时,可按照负荷节点内阻抗与戴维南等值阻抗比值大小确定切负荷顺序,优先切除比值较大的负荷节点。

## 3 计及光伏接入后系统暂态电压稳定的切负荷控制方法

以某一时刻受电的局部电网为研究对象,将外网进行戴维南等值,根据局部电网内光伏典型日出力变化曲线,将运行方式分成  $M$  套数据,不同套数据仅存在光伏出力和受电功率的差异。

根据局部电网与等值外网形成系统导纳模型,若不同方式故障后暂态电压安全稳定裕度小于某一

门槛  $\varepsilon$ , 其中  $\varepsilon$  为趋近于 0 的数, 则判定电压失稳, 需要采取切负荷等紧急控制措施。

### 3.1 光伏汇集站对外等效导纳指标

由于光伏并网系统电压失稳主要由汇集站无功需求与系统无功传输能力失衡所致<sup>[19-20]</sup>, 可将从汇集站看进去的光伏发电系统等效为无功负荷节点, 式(3)可等效为

$$Q_{L\Sigma} = \Sigma B_S \cdot U_N^2 \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

等式两边同时除以  $U_N^2$  得到

$$\frac{Q_{L\Sigma}}{U_N^2} = \Sigma B_S \cdot 10^{-3} \quad (5)$$

式中,  $B_S$  为光伏发电等效电纳。

本文将该指标定义为光伏汇集站对外等效导纳指标, 由于实际系统中光伏发电单元、变压器等效绕组及输电线路等效导纳在故障动态变化过程中无法直接测量, 可通过测量光伏发电系统总的无功消耗随并网点电压变化反映并网点暂态电压稳定特性。但由于该指标本身不具备系统稳定性判别能力, 需要与电压失稳判据结合起来使用, 在判别系统电压失稳情况下确定光伏汇集站对外等效特性。

由图 3 可知, 故障扰动后光伏汇集站对外吸收无功在一定时间内保持不变, 因此, 可通过故障后一定时间内光伏汇集站对外等效导纳<sup>[21]</sup>变化反映电压失稳程度, 指导紧急控制措施量。即

$$\Delta \frac{Q}{V^2} = \frac{Q_t}{V_t^2} - \frac{Q_{t0}}{V_{t0}^2} \quad (6)$$

式中:  $\Delta \frac{Q}{V^2}$  为光伏汇集站的等效导纳变化量;  $\frac{Q_t}{V_t^2}$

为  $t$  时刻光伏汇集站等效导纳;  $\frac{Q_{t0}}{V_{t0}^2}$  为故障时刻光伏汇集站等效导纳。

该指标反映光伏汇集站无功需求增加或交流母线电压跌落明显时系统的暂态电压水平, 其值越大, 该汇集站的暂态电压稳定性越差。

### 3.2 电压失稳主导因素识别

局部电网存在  $N$  个光伏汇集站, 故障后  $t$  时间, 从第  $i$  个汇集站看进去, 光伏场站吸收的无功功率变化为

$$\Delta Q_i = Q_{i,t} - Q_{i,t0} \quad (7)$$

式中: 根据故障后光伏电站无功电压特性及规律,  $t$  一般取为 1~2 s;  $Q_{i,t}$  为  $t$  时刻从第  $i$  个汇集站看进去光伏场站吸收的无功功率;  $Q_{i,t0}$  为故障时刻从第  $i$  个汇集站看进去光伏场站吸收的无功功率。

由于光伏并网容量相对较小时, 故障后光伏汇集站从系统中吸收的无功功率变化很小, 即可通过

$\max \Delta Q_i$  判别电压失稳主导因素:

$$\max \Delta Q_i = \begin{cases} \leq 0, & \text{电压失稳主导因素为断面} \\ > 0, & \text{电压失稳主导因素为光伏} \end{cases} \quad (8)$$

若电压失稳主导因素为断面, 则故障后切负荷量与断面功率近似成线性关系, 切负荷量定义为

$$\Delta P_D = K_D P_j \quad (9)$$

式中:  $j$  为发生故障的交流线路;  $P_j$  为故障前线路功率;  $K_D$  由系统运行工况确定, 工程中一般取为 0.2~0.3。

若电压失稳主导因素为光伏, 则采用本文定义的光伏汇集站等效导纳变化量指标指导切负荷量为

$$\Delta P_G = K_G \times \left\{ \max \Delta \frac{Q_i}{V_i^2} \right\} \quad (10)$$

式中:  $\Delta \frac{Q_i}{V_i^2}$  为光伏汇集站等效导纳变化量,  $i \in N$ ;

$K_G$  由光伏接入比例及规模确定的电压稳定折算切负荷系数。

由于不同方式及光伏无功电压特性下光伏场站等效导纳也不同, 且光伏接入比例越大, 由式(5)可知等效导纳越大, 即恶化电压作用也越强。

### 3.3 切负荷控制策略制定

综合考虑不同负荷节点电压灵敏度指标, 并按照不同电压失稳主导因素下切负荷量依次匹配灵敏度指标较大的负荷, 形成  $M$  套光伏不同出力及运行方式下切负荷策略。由于切负荷量不完全等于各节点可切负荷功率之和, 为满足系统电压稳定要求, 可适当多切负荷, 但切负荷量应满足不同节点最大切负荷比例约束。

### 3.4 算法流程

通过计算外网等值的局部电网电压稳定指标, 判断电压失稳情况, 以故障后光伏汇集站无功特性变化识别电压失稳主导因素, 制定失稳因素为光伏主导和断面主导时切负荷控制策略, 实现对电压薄弱节点负荷的切负荷控制, 具体流程如图 5 所示。

## 4 算例分析

以 2016 年冬季平峰方式海西地区为例验证切负荷控制方法, 如图 6 所示。青海海西地区负荷 950 MW, 柴拉直流正送 300 MW, 格尔木地区风电未出力, 小水电和自备电厂出力 100 MW, 巴音、柏树、乌兰等地区光伏日出力为 0~940 MW, 格尔木断面(柴达木主变下网+330 kV 巴盐线+330 kV 乌宗线)受电功率相应为 1 020~80 MW, 根据光伏出力情况分为 7 种运行方式, 研究柴达木(双主变配置)主变检修下运行主变故障后紧急控制策略。7

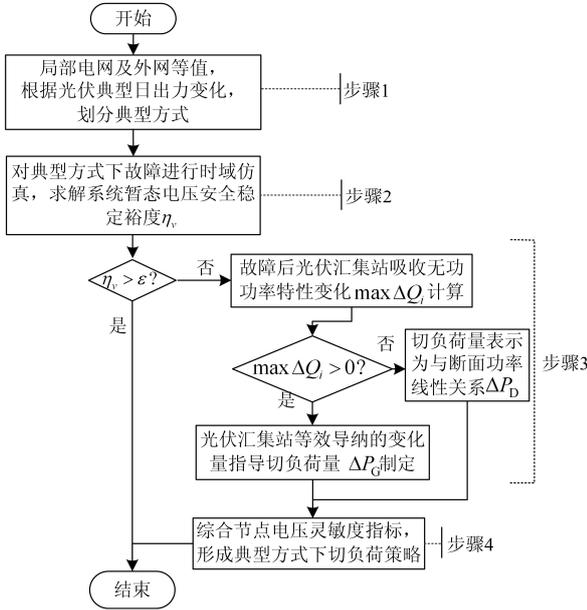


图 5 切负荷控制方法流程图

Fig. 5 Flow chart of load shedding control strategy

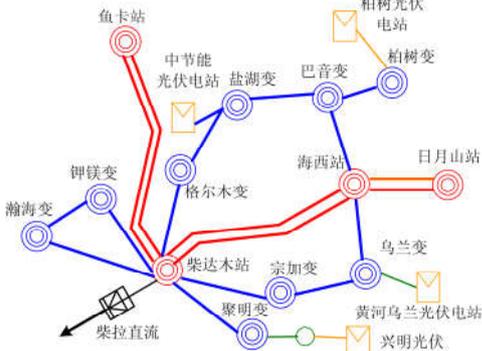


图 6 海西地区结构示意图

Fig. 6 Structure of Hai-Xi power system

种方式下系统故障后暂态电压安全稳定裕度均为 -100%，海西地区 330 kV 母线电压失稳，电压薄弱负荷节点依次为瀚海、格尔木、盐湖及巴音，取  $K_D$  为 0.2， $K_G$  为 -0.2， $t$  取故障后 1 s，其中聚明光伏电站对电压响应最敏感。

仿真发现，不论光伏机组出力多少，其在暂态过程中吸收的无功功率一直保持为 0，而光伏出力越大，功率穿越升压变送至光伏汇集站以及更高一级电网时无功损耗越大。当光伏出力在 600 MW 以上时，从聚明光伏电站看进去，光伏汇集站在暂态过程中吸收的无功功率随着格尔木内部光伏出力的增大而增大，汇集站暂态电压越来越低，如表 1 和图 7 所示。

由式(8)可判定光伏出力小于 600 MW，即格尔木断面功率大于 420 MW 时柴达木主变故障后电

表 1 不同方式下光伏汇集站无功变化

Table 1 Reactive power change of PV power collection

station in different modes							
方式	1	2	3	4	5	6	7
海西光伏/MW	0	200	400	600	700	900	940
格尔木断面/MW	1 020	817	618	420	322	124	80
聚明汇集站 $V_{i0}$ / p.u.	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
聚明汇集站 $V_i$ / p.u.	1.04	1.01	0.99	0.98	0.84	0.73	0.69
$\Delta Q$ /Mvar	-14	-2	-1	-1	2	45	70

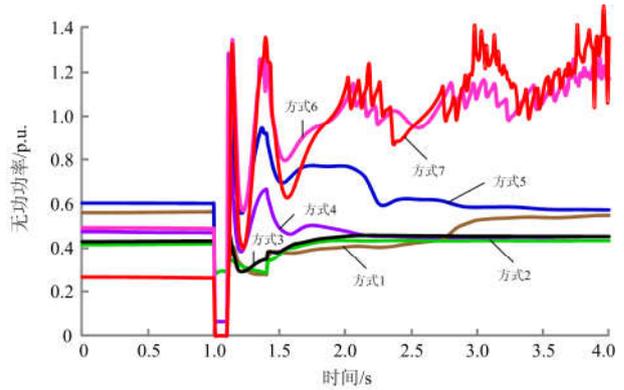


图 7 聚明出线无功响应曲线

Fig. 7 Reactive power response curve of test line

压失稳主导因素为断面，而格尔木断面功率小于 420 MW 时电压失稳主导因素为光伏，因此，暂态电压拐点出现在光伏接入 600 MW、格尔木断面 420 MW。分别将不同主导因素采集电气量代入式(9)、式(10)，得出不同方式断面功率下对应的切负荷功率曲线如图 8 所示。

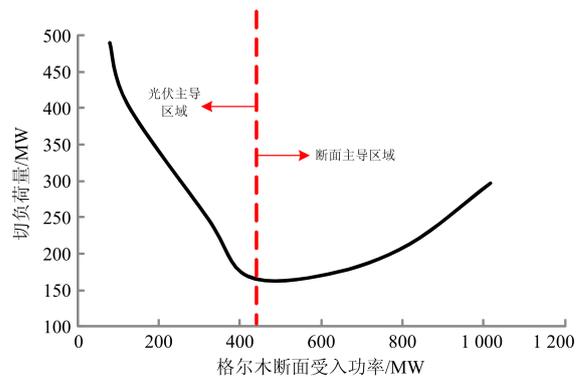


图 8 切负荷策略与断面功率对应关系

Fig. 8 Relationship between load shedding strategy and AC transmission section power

由图 8 左半段可知，随着光伏并网容量的不断增加，虽然格尔木受入断面功率减小即通过交流通道传递的无功功率减少，但光伏场站从交流电网吸

收的无功总体呈现持续增大的趋势, 恶化系统电压稳定特性, 光伏容量增加对通道潮流转移带来的改善作用远不及其无功增加导致的电压恶化作用, 导致系统总体紧急切负荷控制逐渐增大; 而图 8 右半段光伏接入容量较小, 汇集站对外等效导纳变化不大, 即暂态过程中从交流系统吸收的无功不变, 电压失稳的主导因素为故障后通道无功功率转移, 与传统根据断面功率确定切负荷量规律一致。因此, 按照图 8 所示切负荷量匹配不同灵敏度的薄弱负荷节点, 方式 1—方式 7 下切除瀚海、格尔木、盐湖及巴音 169~490 MW 负荷后, 系统暂态电压稳定裕度大于 0, 系统恢复安全稳定运行。

## 5 结论

1) 大受电方式下, 少量增加光伏时, 有利于改善通道潮流转移带来的暂态电压跌落, 且光伏汇集站从交流系统吸收无功在暂态前后无较大变化。

2) 随着光伏并网容量的不断增加, 光伏汇集站从交流电网吸收的无功总体呈现持续增大的趋势。当光伏出力越过暂态电压拐点时, 光伏场站吸收的无功功率急剧增加, 其对通道潮流转移带来的改善作用远不及其无功增加导致的电压恶化作用。

3) 定义的光伏汇集站等效导纳指标能够有效指导通道故障后切负荷量, 满足电压失稳后负荷控制需求, 实现对电压薄弱节点负荷的切负荷控制。

4) 提出的高渗透率光伏接入电网后切负荷控制方法, 能够有效判断暂态电压失稳拐点, 解析了切负荷控制量与电压失稳电气量的对应关系, 提高了紧急控制自动化程度。

## 参考文献

- [1] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [2] 薛峰, 蔡云峰, 徐宁, 等. 基于功率解耦控制的并网光伏发电系统机电暂态模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 63-70.  
XUE Feng, CAI Yunfeng, XU Ning, et al. Mechanical and magnetic transient model of grid-connected photovoltaic system based on power decoupling control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 63-70.
- [3] 韩柳, 庄博, 吴耀武, 等. 风光水火联合运行电网的电源出力特性及相关性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 91-98.  
HAN Liu, ZHUANG Bo, WU Yaowu, et al. Power source's output characteristics and relevance in wind-solar-hydro-thermal power system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 91-98.
- [4] SCHAEFER J C. Review of photovoltaic power plant performance and economics[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1990, 5(2): 232-238.
- [5] 郑超, 林俊杰, 赵健, 等. 规模化光伏并网系统暂态功率特性及电压控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1059-1071.  
ZHENG Chao, LI Junjie, ZHAO Jian, et al. Transient power characteristic of scaled photovoltaic grid-connected system and its voltage control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1059-1071.
- [6] 李兆伟, 刘福锁, 崔晓丹, 等. 计及电力安全事故风险的电网动态分区与切负荷协调控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 35-40.  
LI Zhaowei, LIU Fusuo, CUI Xiaodan, et al. Coordinate control study for dynamic division and load shedding considering electrical security accident risk[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 35-40.
- [7] 李卫星, 牟晓明, 孙勇. 基于解析灵敏度的低压切负荷优化控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 67-73.  
LI Weixing, MOU Xiaoming, SUN Yong. An under voltage load shedding method based on analytical sensitivity[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 67-73.
- [8] TAYLOR C W. Concepts of undervoltage load shedding for voltage stability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(2): 480-488.
- [9] CHEN Qixin, ZHAO Xiangyu, GAN Dahua. Active-reactive scheduling of active distribution system considering interactive load and battery storage[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 320-330. DOI: 10.1186/s41601-017-0060-2.
- [10] 李鹏, 郝治国, 张保会, 等. 一种防止电压失稳的切负荷控制方法[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 32-37.  
LI Peng, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. A voltage instability-avoidable control method for load shedding[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 32-37.
- [11] 傅旭, 王锡凡. 一种新的节点静态电压稳定指标及切负荷算法[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 8-12.  
FU Xu, WANG Xifan. A new index of nodal static voltage stability and load shedding[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 8-12.
- [12] 郭明亮, 戴朝华, 邓惠文, 等. 基于单体光伏/单体储能电池模组的新型光伏储能发电系统[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 56-61.  
WU Mingliang, DAI Chaohua, DENG Huiwen, et al. A novel PV energy storage generating system based on single PV cell/single energy storage cell module[J]. Power

System Protection and Control, 2017, 45(3): 56-61.

[13] 王颖, 文福拴, 赵波, 等. 高密度分布式光伏接入下电压越限问题的分析与对策[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1200-1206.  
WANG Ying, WEN Fushuan, ZHAO Bo, et al. Analysis and countermeasures of voltage violation problems caused by high-density distributed photovoltaics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1200-1206.

[14] 赵金利, 余贻鑫. 电力系统电压稳定分区和关键断面的确定[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(17): 1-5.  
ZHAO Jinli, YU Yixin. Determination of power system voltage stability regions and critical sections[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(17): 1-5.

[15] 李升, 卫志农, 孙国强, 等. 大规模光伏发电并网系统电压稳定分岔研究[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 17-22.  
LI Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Voltage stability bifurcation of large-scale grid-connected PV system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 17-22.

[16] 续昕, 张恒旭, 李常刚, 等. 基于轨迹灵敏度的紧急切负荷优化算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 143-148.  
XU Xin, ZHANG Hengxu, LI Changgang, et al. Emergency load shedding optimization algorithm based on trajectory sensitivity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 143-148.

[17] 任先成, 薛禹胜, WU Q H, 等. 低频低压切负荷布点及轮次的优化与协调[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 1-7.  
REN Xiancheng, XUE Yusheng, WU Q H, et al. Optimization and coordination of UF/UVLS placement and multi-step load shedding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 1-7.

[18] 牟晓明, 李志民. 电压薄弱节点的在线识别与控制方法[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 163-168.  
MU Xiaoming, LI Zhimin. An analytical method for online identification and control of voltage weak buses[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 163-168.

[19] 杜潇, 周林, 郭珂, 等. 大型光伏电站静态电压稳定性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3427-3434.  
DU Xiao, ZHOU Lin, GUO Ke, et al. Static voltage stability analysis of large-scale photovoltaic plants[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3427-3434.

[20] CRACIUN B I, MAN E A, MURESAN V A, et al. Improved voltage regulation strategies by PV inverters in LV rural networks[C] // 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), June 25-28, 2012, Aalborg, Denmark: 775-781.

[21] 李晔, 张保会. 基于负荷无功电压响应的切负荷控制决策优化[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 106-111.  
LI Ye, ZHANG Baohui. Load shedding scheme optimization based on load voltage and reactive power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 106-111.

收稿日期: 2017-08-23

作者简介:

张红丽(1989—), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统分析及控制研究; E-mail: zhanghongli@sgepri.sgcc.com.cn

刘福锁(1981—), 男, 硕士, 高工, 研究方向为电力系统分析及控制;

李威(1976—), 男, 博士, 研究员级高工, 研究方向为电力系统分析及控制。

(编辑 许威)