

低压减载在有源配电网电压稳定性中的应用研究

如何抑制电力系统电压崩溃，对整个电网都有着至关重要的作用，而低压减载是维持电压稳定的有效手段。随着分布式电源（DG）的接入，通过选择合理有效的切负荷节点，可以使有源配电网在较短时间内回到稳定运行的状态。首先从系统电压稳定特性出发，介绍了相应的特性原理，同时考虑接入不同类型DG，进一步探讨低压减载的设计方案，按照不同的故障类型进行考虑和配置设计。最后通过选取磐安县电网中已有接入DG电网部分进行实例分析，证明了该方法能够保证系统电压快速恢复和较高的稳定裕度，同时验证了该方法的合理性和有效性。

王光增¹ 吴哲慧² 黄建¹ 程云华¹ 陈坚³/1.国网金华供电公司 2.山东大学管理学院 3.国网磐安县供电公司

0 引言

随着能源需求的逐步提升，城市输电网和配电网规模逐渐扩大，分布式能源（DER）和分布式电源（DG）多样性增多，进而电压稳定性的作用就愈发凸显。电压稳定研究的主要目的是开发和应用有效的控制策略来防止电压崩溃，现阶段普遍认为，防止电网出现电压崩溃事故，至少应当与防止出现同步运行失稳事故一样给予相同的重视^[1]。配电网中的电压稳定性问题同样也引起了重视。分布式电源的高渗透接入对配电网产生了新的潮流冲击，有源配电网电压稳定面临新的问题。

文献[2-4]考虑了发电机组动态作用的潮流方程，通过对微分代数方程进行求解，并对解的情况进行分析，认为电压失稳的原因在于局部解不唯一。文献[5-7]从负荷的角度对配电网的稳定性进行了分析，给出负荷的动态特性方程，

根据系统的 $P-G$ 关系曲线和 $V-G$ 关系曲线，结合计算得到的临界运行点，对电压失稳机理进行细致分析。文献[8-9]分析电力系统功率平衡，在此基础上得出的结论是，电压失稳是由于系统有功和无功不平衡造成的。文献[10]提出电压失稳风险指标，采用灵敏度方法来确定负荷切除地点和负荷切除量。文献[11-12]依据马尔可夫方法结合概率值分析低压减载各种方案动作情况，与电压崩溃风险理论相互结合，确定最终负荷切除量，保证系统承受的风险最小。但是目前电压稳定性方面的研究主要集中于输电网，配电网中特别是考虑DG影响的有源配电网电压稳定性研究尚未涉及。

本文首先对系统的电压稳定特性进行理论分析，进而讨论低压减载理论模型，得到系统中节点电压与负荷大小之间存在的函数关系。其次，构建系统节点电压灵敏度函数，通过比较灵敏度确定值，得到效果最优的切负荷节点，给出适用于负荷现阶段发展情况的有源配电网的低压减载整定方案。最后构建实际算例，结合浙江磐安地区有源配电网进行仿真验证，证明本文方法的可行性和正确性。

1 低压减载作用机理分析

1.1 低压减载的数学原理推导

通过单机无穷大系统对低压减载作用机理进行简单分析。如图1所示，发电机G通过系统中线路向负荷节点LD供



王光增/高级工程师

关键词/Keywords

低压减载 ·
电压稳定性 ·
DG ·
有源配电网 ·
灵敏度 ·

电。

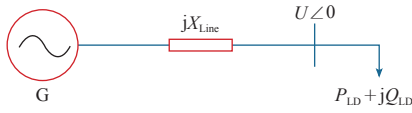


图1 单机无穷大系统示意图

对于线路阻抗采用集中阻抗处理方法, 定义总阻抗表达式^[13]为

$$Z_{\text{Line}} = R_{\text{Line}} + jX_{\text{Line}} \approx jX_{\text{Line}} (R_{\text{Line}} \ll X_{\text{Line}}) \quad (1)$$

同样定义负荷阻抗大小表达式为

$$Z_{\text{LD}} = R_{\text{LD}} + jX_{\text{LD}} = |Z_{\text{LD}}| \angle \theta \quad (2)$$

负荷功率为

$$S_{\text{LD}} = P_{\text{LD}} + jQ_{\text{LD}} \quad (3)$$

进一步, 作出系统的电气相量图并进行分析, 如图2所示。

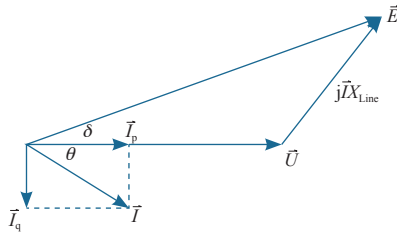


图2 单机无穷大系统电气相量图

按照图2进行数学分析, 可以得到

$$\vec{E} \angle \delta = \vec{U} \angle 0 + j\vec{I}X_{\text{Line}} \quad (4)$$

$$\begin{cases} E \sin \delta = IX_{\text{Line}} \sin (90^\circ - \theta) = IX_{\text{Line}} \cos \theta \\ E \cos \delta - U = IX_{\text{Line}} \cos (90^\circ - \theta) = IX_{\text{Line}} \sin \theta \end{cases} \quad (5)$$

并且根据有功功率和无功功率表达式

$$\begin{cases} P_{\text{LD}} = UI \cos \theta \\ Q_{\text{LD}} = UI \sin \theta \end{cases} \quad (6)$$

消去 δ 后, 由式(4)和式(5)可以得到

$$P_{\text{LD}}^2 + \left(Q + \frac{U^2}{X_{\text{Line}}} \right)^2 = \left(\frac{EU}{X_{\text{Line}}} \right)^2 \quad (7)$$

式中, P_{LD} 和 Q_{LD} 为自变量, 进行简单的数学处理方式, 化简为以 $(U/E)^2$ 作为因变量的二元一次方程, 求解得到结果为

$$\left(\frac{U}{E} \right)^2 = \frac{1}{2} \left[1 - 2 \frac{Q_{\text{LD}} X_{\text{Line}}}{E^2} \pm \sqrt{1 - 4 \frac{Q_{\text{LD}} X_{\text{Line}}}{E^2} - 4 \left(\frac{P_{\text{LD}} X_{\text{Line}}}{E^2} \right)^2} \right] \quad (8)$$

式中, 取“+”时, 表示电压稳定解; 取“-”号, 表示电压不稳定解。

若

$$\sqrt{1 - 4 \frac{Q_{\text{LD}} X_{\text{Line}}}{E^2} - 4 \left(\frac{P_{\text{LD}} X_{\text{Line}}}{E^2} \right)^2} = 0 \quad (9)$$

由式(8)可知, 此时存在最低工作电压, 这就是临界电压点, 即

$$\left(\frac{U}{E} \right)_{\min} = \sqrt{0.5 + \frac{Q_{\text{LD}} X_{\text{Line}}}{E^2}} \quad (10)$$

对 $P_{\text{LD}} X_{\text{Line}}/E^2$ 赋予不同的值, 可以得到不同的结果, 简单从函数表达式来看, 这符合增函数性质, 也就是随着 $P_{\text{LD}} X_{\text{Line}}/E^2$ 增大, 函数值增大。这就说明, 有功负荷越大, 系统安全稳定运行的临界电压越高。当接入DG后, 整个电网安全运行的条件变得更容易达到, 可以很好地提升系统稳定性。

1.2 低压减载的电气分析

不管网络结构复杂与否, 根据Thevenin's定理, 从系统任意节点看向系统, 在任何极短时间内, 都能将外部系统等价为一个电源经过传输阻抗向负荷供电的过程^[14]。同时和前文保持一致, 假定传输阻抗只有电抗部分, 同样对式(8)进行分析。

网络中任意选取一个电压节点, 该点的临界稳定电压比值表示为

$$\left(\frac{U}{E} \right)_{\text{cr}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - 2 \frac{Q_{\text{LD}} X_{\text{Line}}}{E^2} \right)} \quad (11)$$

根据上文所述, 保证不发生电压崩溃的临界条件为

$$\sqrt{1 - 4 \frac{Q_{\text{LD}} X_{\text{Line}}}{E^2} - 4 \left(\frac{P_{\text{LD}} X_{\text{Line}}}{E^2} \right)^2} = 0 \quad (12)$$

进而可以求出临界的电动势为

$$E_{\text{cr}}^2 = 2X_{\text{Line}} \left(Q_{\text{LD}} + \sqrt{P_{\text{Line}}^2 + Q_{\text{Line}}^2} \right) \quad (13)$$

那么该节点的母线电压稳定临界值可以表示为

$$U_{\text{cr}} = X_{\text{Line}} \sqrt{P_{\text{Line}}^2 + Q_{\text{Line}}^2} \quad (14)$$

由式(14)可知, 网络中任一节点的电压临界点是该点的等效阻抗的函数, 同时也是相应负荷的视在功率的函数。

网络中的不同节点有着不同的稳定值，视在功率越大，临界电压值越高；当节点的功率固定不变时，该点的临界电压值由于外部系统相连所形成的到该点等效短路阻抗 X_{Line} ，而与发电机组的运行方式等因素无关。

因此，在运行负荷过大或一些无功补偿能力有限的负荷集中地区，导致在运行过程中电网枢纽点电压持续降低，防止发生电压崩溃的最佳措施就是适当地切除部分负荷^[15]，即采用低压减载可有效降低临界电压，使系统电压保持稳定。

当电网传输的有功功率减少时，会造成节点的临界电压减少，同时供电电压 U 提高，这样电压稳定裕度提高，系统稳定性更好。在母线电压降低，并且可能导致系统电压崩溃的前提下，通过低压减载的确定方法削减部分负荷，保证母线运行电压从电压临界崩溃点脱离，从而提升整体的电压稳定性。当DG接入以后，节点的供电电压可以在短时间内得到提升，同时提升了电压稳定裕度。

2 低压减载配置方案设计

2.1 低压减载配置总体思路

低压减载整定过程的重要参数包括以下三个方面：削减负荷的时间、削减负荷的位置以及削减负荷的数量。因此在计算低压减载整定值时，需要经过细致计算，避免出现整定不当导致严重后果产生。如果整定结果失准，会出现以下两种情况：①当整定结果确定值比故障发生后实际所需的切负荷量小时，低压减载的操作结果并不能阻止系统出现电压崩溃的情况，并且错过了最佳的时间，增加了系统崩溃严重程度；②当整定结果确定值比故障发生后实际所需的切负荷量大时，就会导致局部地区母线发生过电压情况，出现误切、过切等问题，同样会造成系统情况的恶化。

整定过程中参数的确定与故障类型、系统运行方式、网络结构和负荷模型有很大的关系^[16-17]。从数学意义上看，削减负荷的整定过程可以抽象为组合最优问题，同时将最优问题建立在微分代数

方程组上。此时三个重要参数（削减负荷时间、削减负荷位置和削减负荷数量）作为控制变量，在各种预想事故情况下，使削减负荷量最小。

具体的整定参数可以通过如下的步骤确定：

1) 预估系统中较为薄弱的环节，找到可能产生电压失稳情况的区域。

2) 确定区域后，选取其中关键母线，据此作为监测点。

3) 考量最严重情况下的系统运行情况。假设发生最严重的单一事故，通过 $P-V$ 曲线来确定最小运行电压，通过 $Q-V$ 曲线来确定最小无功需求。

4) 确定最小运行电压和最小无功需求后，再次结合 $P-V$ 曲线确定负荷削减量。

5) 在确定负荷削减量之后，通过 $Q-V$ 曲线来验证负荷削减量是否达到裕度指标的标准。

2.2 低压减载灵敏度削减算法

用灵敏度分析决定最佳低压减载策略已得到应用^[18]，但这种方法在一些极端情况下无法准确运行，也无法确定出需要的最小减载量。本文中采用无功灵敏度的方法，确定薄弱环节所在区域的低压减载量，以实现局部区域的无功平衡，方法如下：

1) 在发生某一个严重故障且造成大量无功缺少的情况下，使节点电压降落到 U_t （标么值），这样与理想状态下（标么值电压为1）的灵敏度可以表示为

$$\frac{dU}{dQ_{LD(i-1)}} = \frac{1-U_t}{\Delta Q_{LD(i-1)}} \quad (15)$$

式中， $\Delta Q_{LD(i-1)}$ 为此次减载之前无功缺少量的标么值。

2) 经过本轮次的削减负荷之后（记为削减量 $\Delta Q_{LD(i)}$ ），电压恢复到了系统预先设定的允许电压（记为 U_{recv} ），此时灵敏度表达式为

$$\frac{dU}{dQ_{LD(i)}} = \frac{1-U_{recv}}{\Delta Q_{LD(i)}} \quad (16)$$

3) 为了达到电压恢复的目的，使电压恢复过程负荷削减量为

$$\Delta Q_t = \Delta Q_{LD(t-1)} - \Delta Q_{LD(t)} \tag{17}$$

考虑到灵敏度指标的非线性特点，便于简化计算，现将灵敏度在削减范围内设定为一个固定值，记做 $1/K_{QUsen}$ ，得到各轮次减载量为

$$Q_{LD(t)} = \frac{K_{QUsen}(U_{recv} - U_t)}{1 - K_{QUsen}(1 - U_{recv})} \left(1 - \sum_{i=1}^{t-1} Q_{LD(i)} \right) \tag{18}$$

将已确定的薄弱环节所在区域抽象为一个负荷点，结合连续潮流的计算方法，在已确定的薄弱环节所在区域内各节点负荷保持同时增长，一直追溯到电压崩溃为止，计算设置的低压减载最低轮次的电压定值 U_t 与预设定的电压恢复值 U_{recv} 之间的各个灵敏度状态，并简单地取算术平均值作为灵敏度指标，即

$$K_{QUsen(t)} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{dQ^k}{dU_t^k} \tag{19}$$

式中， k 为节点 t 的状态； Q 为已经确定的增加负荷区域总的无功标么值。将各个节点 $K_{QUsen(t)}$ 进行算术平均作为整个区域的 K_{QUsen} ，即

$$K_{QUsen} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n K_{QUsen(t)} \tag{20}$$

依据上述分析结果，可以对电网进行相应的设计。低压减载的整定参数确定过程既要防止小扰动电压失稳，又要防止大扰动电压失稳，同时还要适合于系统不同的运行方式。

考虑现阶段主要的DG为风机和光伏，在本文讨论中也采用常用的Weibul分布和 β 分布模型，不再进行详述。

3 实例分析

磐安县地处浙江省中部，群山环抱，日照条件好，风力资源丰富。目前磐安电网已有两座风电场和光伏发电接入配电网，远景规划建成风光电源多

点接入的主动式有源配电网。为验证本文提出的低压减载方法在有源配电网中的适用性，以磐安县配电网为基础，构建110 kV有源配电网算例。

磐安地区有源配电网示意图如图3所示。图中，字母DG表示分布式电源接入位置；G表示上级电源所在位置。系统总有功发电量为631 MW，总有功负荷为612.5 MW；总无功发电量为190 Mvar，总无功负荷为178.5 Mvar。DG2为磐安廿四尖风电场，装机容量40.5 MW；DG4为规划中风光储电源点，装机容量85 MW；DG5为仁川风电场，装机42 MW；DG7为磐安工业园光伏，装机7.5 MWp。该110 kV配电网分布式电源渗透率72.3%。

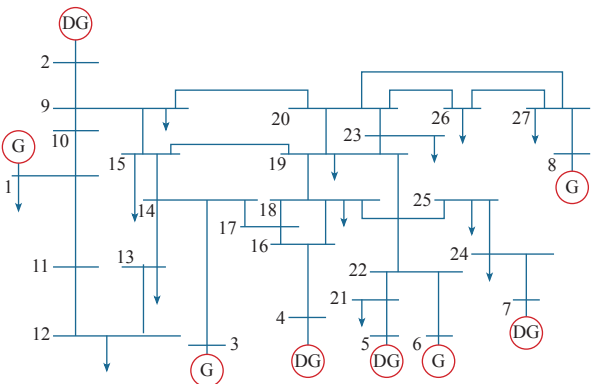


图3 磐安地区有源配电网示意图

首先假定系统因为发生故障，在3 s时刻失去了发电机4，导致网络失去14 Mvar的无功功率，从而使母线电压下降。故障发生后，通过Matlab进行分析，母线19电压下降最大，即下降到0.5左右，不满足安全运行的电压稳定性条件，有可能造成更大面积的电压崩溃，必须对这种不稳定因素进行限制。母线19电压下降仿真波形如图4所示。

通过对整个网络各个母线的灵敏度确定，对系统进行两轮削减负荷。各个母线节点灵敏度大小如表1所示。

表1 各条母线灵敏度系数（第一轮）

编号	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
灵敏度	0.009 4	0.009 6	0.0085 4	0.007 3	0.005 6	0.003 2	0.008 2	0.007 5	0.006 2	0.009 4
编号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
灵敏度	0.010 1	0.006 4	0.007 4	0.006 5	0.015 1	0.010 4	0.014 7	0.003 2	0.004 1	

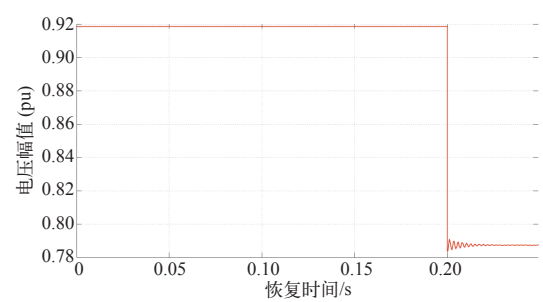


图4 母线19电压下降仿真波形

从表1可以看出，灵敏度系数较大的是23号母

线节点。因此第一轮削减对23号母线进行处理。然后对母线电压进行判断，发现没有达到安全运行的水平。因此继续对系统进行同样的灵敏度计算。在此基础上进一步判断电压恢复的合理性，直至电压恢复到可以接受的范围。

表2列出了第二轮减载各母线灵敏度系数。可以发现，25号母线灵敏度数值较大，对母线电压影响较为明显，第二轮选择对25号母线进行负荷削减。

表2 各条母线灵敏度系数（第二轮）

编号	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
灵敏度	0.007 4	0.007 6	0.008 6	0.009 3	0.006 6	0.001 2	0.004 2	0.006 5	0.005 2	0.007 4
编号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
灵敏度	0.010 5	0.007 4	0.009 4	0.008 5		0.013 4	0.016 7	0.005 2	0.006 1	

按照同样的确定方法，进行第三次和第四次负荷削减，削减的负荷分别是18和21。经过四次削减之后，可以得到电压恢复波形如图5所示。

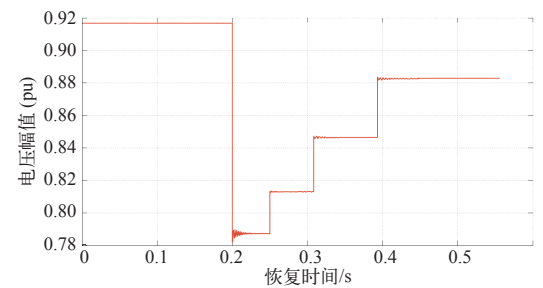


图5 母线19电压下降和恢复仿真波形

通过结合磐安当地DG的分布情况和电网运维水平，以及结合低压减载理论和灵敏度，并通过低压减载的方法，可以在较短时间内恢复电压并到达可以接受的范围内。

4 结束语

本文结合低压减载原理分析，构建了通过负荷切除维持母线运行电压的理论模型，保证了系统远离电压崩溃点，在此基础上，利用DG的随机特性，将理论方法与磐安地区实际电网相结合，实现了短时间内高效恢复电压幅值的目标。本文所构建的低压减载模型，一方面可以保证系统的安全运行，同时兼顾DG接入后对系统的影响，完

善电网应急措施，对分析DG接入电网的影响提供了新的分析角度和研究方向，具有重要的意义。

参考文献

[1] 周双喜, 杨宁, 冯治鸿. 大型电力系统PV曲线的求取 [J]. 电网技术, 1996, 20 (8) : 57-61.

[2] 袁骏, 段献忠, 何仰赞, 等. 电力系统电压稳定灵敏度分析方法综述 [J]. 电网技术, 1997, 21 (9) : 33-36.

[3] 周双喜, 姜勇, 朱凌志. 电力系统电压静态稳定性指标述评 [J]. 电网技术, 2001, 25 (1) : 1-7.

[4] 刘丽霞, 曹国云, 陈陈. 基于静态电压稳定性指标的等价性研究 [J]. 华东电力, 2005, 33 (12) : 1-4.

[5] Taylaor C W. Concept of undervoltage load shedding for voltage stability [J]. IEEE Transactions on PWRD, 1992, 7 (2) : 480-8.

[6] 陈宁, 刘宪林, 王占波. 基于状态流的电力系统低频减载仿真分析 [J]. 电测与仪表, 2015, 52 (14) : 28-32.

[7] Thomas J Overbye. Computation of a practical method to restore power flow solvability [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10 (1) : 280-287.

- [8] Thomas J Overbye. A power flow measure for unsolvable cases [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9 (3) : 1359-1365.
- [9] Zhihong Feng, Venkataramana Ajjarapu, Dominic J Maratukulam. A practical minimum load shedding strategy to minigate voltage collapse [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13 (4) : 1285-1291.
- [10] Zhihong Feng, Venkataramana Ajjarapu, Dominic J Maratukulam. A comprehensive approach for preventive and corrective control to mitigate voltage collapse [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15 (2) : 791-797.
- [11] 王建全, 王伟胜. 电力系统最优切负荷算法 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21 (3) : 33-35.
- [12] 傅旭, 王锡凡. 静态安全分析中的联动切负荷算法 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (9) : 82-86.
- [13] 曲鑫, 王小君, 和敬润. 基于Kruskal遗传混合算法的主动配电网规划策略 [J]. 电气应用, 2015, 34 (8) : 22-25.
- [14] 余庆媛, 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 (23) : 23-26.
- [15] 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 (5) : 45-49.
- [16] 黄镔, 赵良, 马世英, 等. 基于PV曲线的低压减载配置方法 [J]. 电网技术, 2008 (23) : 29-34.
- [17] 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 [J]. 中国电机工程学报, 2005 (1) : 27-31.
- [18] 刘斌, 陈磊, 闵勇. 考虑暂态电压稳定的低压减载地点选择 [J]. 电力系统自动化, 2008 (5) : 11-14.
- (收稿日期: 2016-01-22) **EA**

(上接第31页)

4 结束语

1) 随着“外电入鲁”特高压交、直流工程的逐步实施, 以及山东500 kV电网电压支撑薄弱的进一步凸显, 在未来的规划中, 应考虑加装必要的动态无功设备, 同时, 加强山东电网自身建设, 提高电网的稳定性, 可进一步增强山东电网接受外电的能力。

2) 调相机动态补偿效果要比SVC、STATCOM的补偿效果好, 调相机具备较强的双向调节能力, 在发生严重电压跌落故障时, 短时(1 s左右)动态无功最高输出接近额定容量的2倍, 为系统提供紧急无功电压支撑, 在系统动态过程中, 无功调节鲁棒性好。

3) 临沂换流站500 kV侧加装 3×300 Mvar调相机, 可为系统提供紧急无功电压支撑, 提高短路容量和直流短路比, 降低直流换相失败的风险, 提高故障后电压恢复水平及速度, 故障后系统保持稳定。

参考文献

- [1] 戴武昌, 陈东魁, 张威, 等. 大容量远距离交流输电系统无功平衡及稳态电压控制 [J]. 电网技术, 2013, 37 (4) : 1101-1105.
- [2] 丁理杰, 杜新伟, 周惟婧. SVC与STATCOM在大容量输电通道上的应用比较 [J]. 电力系统保护与控制, 2010 (24) : 77-81.
- [3] 翁利民, 靳建峰. SVC与STATCOM 的性能比较与应用分析 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 38 (4) : 1-4.
- [4] 李来福, 于继来, 柳焯. 戴维南等值参数的漂移问题研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (20) : 1-5.
- [5] 刘振亚. 中国电力与能源 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [6] 夏祖华, 沈斐, 胡爱军, 等. 动态无功补偿技术应用综述 [J]. 电力设备, 2004, 5 (10) : 27-31.

(收稿日期: 2016-02-24) **EA**