

分布式电源接入配电网的双层协调电压控制策略研究

分布式电源接入配网侧引起节点电压分布变化,并使配电网由单电源供电向多端供电转变,传统电压调节的效果受到影响。分析变压器有载调压(OLTC)和储能系统的调压原理,在这两种调压方式的基础上,设计一种适用于分布式电源接入后配电网调压的双层协调控制方法,通过对原有设备的改造与对分布式电源的充分利用,满足配电网电压控制目标,且具有削峰填谷、降低损耗的优点,并能有效延长调压器分接头与储能蓄电池组的设备寿命周期。在 DigSILENT PowerFactory 中仿真验证所提方法的有效性。

张阁 杨艺云 肖圆圆 高立克 肖静/广西电网有限责任公司电力科学研究院

0 引言

分布式电源(DG)在配网侧的接入是配电网发展趋势之一,如《国家能源局关于下达 2015 年光伏发电建设实施方案的通知》中即鼓励各地区优先建设主要在并网点变电台区消纳的分布式光伏发电项目。随着分布式电源渗透率的提高,传统配电网由单电源供电逐渐向多端供电模式转变,对现有配电网潮流和电压控制方法将产生明显影响。

传统配电网潮流从变电站流向用户,在馈线上产生电压降,用户入口电压低于配电变压器二次侧电压,常用变压器有载调压(On Load Tap Changing, OLTC)、加装电容器、提供线路压降补偿等实现电压调节。分布式电源直接接入配电网,会导致节点电压抬升,造成有载调压的分接头和线路压降补偿装置频繁动作,甚至失控。文献[1-2]分析了分布式电源接入配电网引起的电压问题。文献[3-4]

以实例说明 OLTC 在分布式电源接入后能取得的最优电压控制效果。文献[5]设计一套针对传统调压手段的协调控制方法解决 OLTC 频繁动作的问题。文献[6]提出一种双层控制方法,通过非线性规划方法预测潮流,以预测结果为依据对 OLTC 与 SVC 进行控制。

储能系统(Energy Storage System, ESS)是平滑分布式能源间歇性功率波动、削峰填谷、改善电压质量的重要手段^[7-8]。ESS 既是一种分布式电源,又具有快速功率调节及提供电能储备的能力。文献[9]实现光-储联合并网发电系统运行时的电压控制,指出最优运行状态的实现需要充分调用储能系统。文献[10]明确 ESS 对消除电压波动、提高经济性具有积极作用。文献[11]在光伏并网点接入 ESS 单元,设置基于荷电状态(State of Charge, SOC)反馈的充放电策略,有效缓解光伏电源对配电网电压的影响。

为充分利用分布式电源和现有电压调节装置,本文研究设计一种变压器有载调压与储能系统充放电的双层协调控制方法,以大规模分布式电源接入下的配电网电压为控制目标,综合实现减轻分接头动作压力、削峰填谷、降低网损等效果,并在 DigSILENT PowerFactory 中仿真验证。

1 电压问题及其控制

1.1 分布式电源接入引起的电压问题

分布式电源的接入会改变潮流大小与方向,导致节点电压随之变化。



张阁/工程师

关键词/Keywords

分布式电源 ·
电压控制 ·
有载调压 ·
储能系统 ·
双层协调电压控制 ·

若为用户附近或负荷侧接入分布式电源，如图 1 所示，分布式电源接入的公共连接点（PCC）电压可近似表示为

$$V_{PCC} \approx V_2 + R(P_G - P_L) + X(Q_G - Q_L) \tag{1}$$

式中， V_2 表示配电变压器二次侧电压； R 和 X 分别表示用电线路电阻和电抗； P_G 和 Q_G 表示分布式电源发出的有功和无功功率； P_L 和 Q_L 表示负载消耗的有功和无功功率。

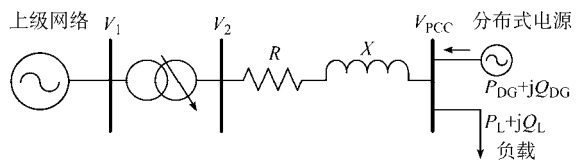


图 1 分布式电源接入负荷侧的配电网

式（1）表明，当线路 X/R 比相对较小时，可能导致 PCC 点电压升高，电压降被抵消，配电变压器一次侧电压越限，出现明显的反向潮流。

若分布式电源的接入位置不在负荷侧、而位

于调压装置下游，则可能发生调压装置实际测得的负荷减少的情况，导致电压补偿的目标电压值低于馈线末端电压维持在电压范围内的实际值，不能正确调压，馈线电压过低。

因此，大规模分布式电源接入后的配电网调压策略需进行改造设计。

1.2 有载调压

有载调压响应速度快、自动化程度高，可控制低压侧母线电压维持在恒定水平，并降低功率损耗，是配电网调压的重要手段之一。图 2 表示 OLTC 控制结构原理。以一个有载调压变压器所在的简单辐射状配电网为例，如图 3 所示。

其中，线路电压降落补偿模块通过线电压和负荷电流计算补偿电压 V_{com} ，以预测馈线远端电压，实现额定负载下母线 3 电压在给定范围内的调节；在电压调节器之后、分接头变化装置之前引入时延环节，以避免非必要的由暂态电压变化引起的分接头调整；当预计到电压将越限时，改变分接头位置。式（2）是图 3 中母线 3 的补偿电压值。

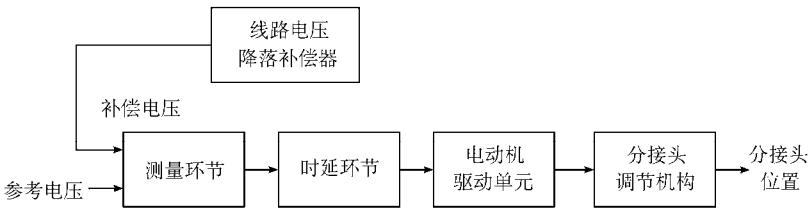


图 2 OLTC 控制结构

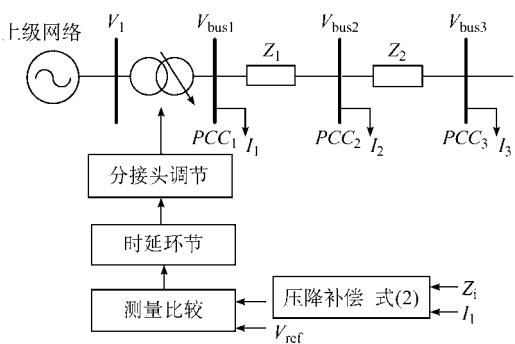


图 3 有载调压变压器所在的辐射状配电网示意

$$V_{com} = V_{bus1} - Z_1 \cdot I_2 - (Z_1 + Z_2) \cdot I_3 \tag{2}$$

式中， Z_1 、 Z_2 表示所在线路的阻抗； V_{bus1} 表示位于变压器二次侧的母线 1 电压测量值；负荷母线电流 I_2 、 I_3 是估计值。

光伏、风电等间歇性 DG 实际工作时负荷电流较难预测，为达到其接入后的电压控制目标，需改造 OLTC 的信号响应模式。本文设计通过加入实时测量环节，如智能电表等设备^[12,13]，向控制器实时发送负荷电流、节点电压等信息，实现更精确的控制器动态响应，保证馈线电压维持在限值内。

1.3 储能系统调压与改善峰谷差

通过控制储能系统的充放电控制单元，既可以实现快速响应的配电网调压，又能平抑功率、改善负荷特性，是一种有效改善分布式能源出力波动对配电网电压影响的方法。

式（3）、式（4）分别表示节点电压指标 I_{vp-i} 和馈线电压指标 I_{vf} ，用于定量分析 ESS 对配电网电压的影响。

$$I_{vp-i} = \frac{(V_i - V_{\min})(V_{\max} - V_i)|P_i|}{(V_n - V_{\min})(V_{\max} - V_n) \sum_{j=1}^M |P_j|} \quad (3)$$

$$I_{vi} = \sum_{i=1}^M I_{vp-i} \quad (4)$$

式中, V_i 表示节点 i 的电压幅值; V_n , $V_{\max}$, $V_{\min}$ 分别表示节点电压额定值和上下限值; P_i 表示节点 i 的注入功率; M 为馈线总节点数。

式 (3) 表明, 节点电压指标 I_{vp-i} 越小, 该节点偏离额定电压的程度越大, 该节点对馈线电压水平的影响越小; 若 I_{vp-i} 为负, 该节点电压越限。式 (4) 表明, 馈线电压指标值越大, 馈线整体电压水平越好。通过控制储能系统, 使其在电压低于下限时发出功率、提升节点电压幅值, 当电压超过上限时吸收功率、降低其电压, 从而改善配电网电压指标。

除调压作用外, ESS 的削峰填谷效果也可以定量分析。式 (4) 表示 ESS 接入后馈线负荷峰谷差。可以看出, 接入的总储能越大, 削峰填谷作用越明显, 理想时甚至可使馈线峰谷差达到零。

$$P'_{\text{gap}} = \begin{cases} P_{\text{gap}} \left(1 - \frac{E}{S}\right) & E \leq S \\ 0 & E > S \end{cases} \quad (5)$$

式中, P'_{gap} 表示 ESS 接入后馈线全天负荷峰谷差; P_{gap} 表示馈线全天负荷峰谷差; E 表示 ESS 总能量; S 表示理想削峰能量。

本文选用发展较为成熟的蓄电池组作为储能设备, 用 SOC 表示其剩余容量与其完全充电状态容量的比值, 反映即时储能用量。在设计充放电控制策略时, 应考虑到电池循环使用次数与电池放电深度 (DOD) 呈指数递减关系, 有研究表明将 DOD 控制在 20% 对电池寿命有益^[14]。

2 双层协调电压控制设计

2.1 控制原理与目标

本文设计一种双层协调电压控制策略, 与传统电压控制策略相比, 考虑通过协调控制有载变压器分接头位置和储能系统充放电动作, 实现含分布式电源接入的配电网的电压调节。基本思路如下: 非峰荷时段下, 当发生电压上升时, 首先动作有载变压器分接头位置, 并由协调控制单元

向 ESS 的 SOC 控制单元发出充电信号、吸收反向潮流, 以减轻变压器操作压力; 峰荷时段下, 协调控制单元相应地对 ESS 的 SOC 控制单元发出放电信号, 实现削峰。控制系统在配电网中的结构与设备如图 4 所示。在变压器分接头加装了可实现实时测量的智能电表以采集与反馈本地数据。

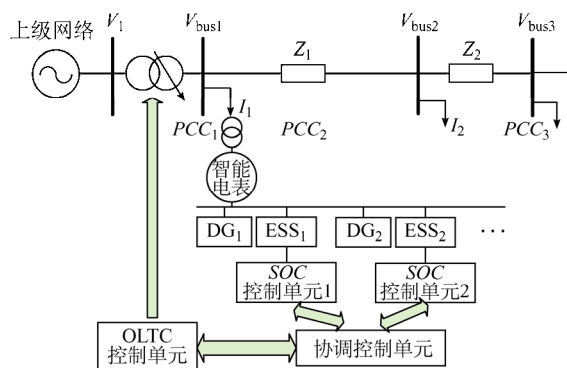


图 4 双层协调电压控制的系统结构

这种双层协调电压控制设计综合考虑 OLTC 动作和电池寿命要求, 主要实现的控制目标包括: ①对变压器分接头的操作进行优化控制设计, 使其满足更少的动作次数、动作时承受更小的电压应力的要求, 降低动作成本、提高设备寿命。②峰荷时段下, 分布式储能装置能提供有功功率, 利于降低成本、削峰、优化和满足系统要求。③由于反向潮流的存在, 变压器分接头的动作会被影响。通过引入储能装置, 有效减少反向有功潮流, 避免分接头误动、甚至导致失控的极端情况。④在分布式电源接入或退出运行的情况下都可以运行, 并实现电压控制、削峰填谷。

2.2 控制流程

双层协调电压控制策略的控制流程如图 5 所示。其中, 以协调控制单元作为主控制层, OLTC 控制单元和 SOC 控制单元作为响应层。

协调控制单元主要具备两个功能: 接收 OLTC 控制单元和 SOC 控制单元发出的参数, 协调 OLTC 动作与 ESS 充放电; 收集实时数据并预测未来短期峰荷, 峰荷预测的结果对放电操作具有优先级。如果母线 1 电压越限, 变压器分接头先动作, 根据动作完毕后的电压是否回到规定限值内, 进一步判断 ESS 是否充电; 如果母线 1 电压未越限、而母线 2 或 3 电压越限, 变压器分

接头不动作，直接对 ESS 发出充电指令。若未发生由分布式电源接入引起的节点电压抬升，OLTC 仍用传统控制策略维持整条馈线电压处于限值内；若检测到电压抬升，协调控制单元可以使分接头的额外动作次数最小化。

OLTC 控制单元中，定义控制变量 VAR ，用于判断是否发生电压抬升造成的越限，并在 OLTC 单元与协调控制单元之间传输信号。若发生电压越限， VAR 值定义为 1，变压器分接头动作指令被激活，限制母线 1 电压维持在限值内。

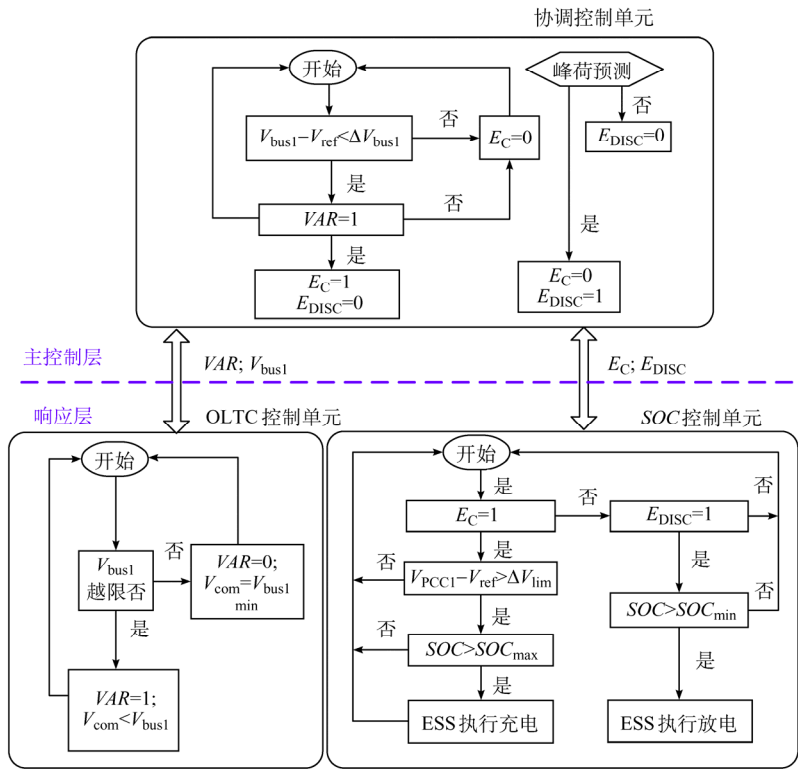


图 5 双层协调电压控制流程图

ESS 的 SOC 控制单元从协调控制单元接受充电或放电指令。充电信号指示储能模块开始充电，实现反向潮流的吸收。若 PCC 点电压越限，协调控制单元判断后发出充电指令，在满足当前 SOC 小于最高 SOC 限制的情况下，ESS 执行充电动作；若协调控制单元发出放电指令，在满足当前 SOC 高于最低 SOC 限制的情况下，ESS 执行放电动作。在充放电动作时，SOC 控制单元将一直监测 SOC 是否满足给定的限额，以尽量延长电池使用寿命。SOC 的上下限值根据选用的储能模块参数预设。

3 仿真与分析

3.1 分布式电源接入配电网算例

本文以国际大电网会议（CIGRE）C6.04.02 工作组给出的可再生和分布式电源接入基准系

统为模型，如图 6 所示。在 N7~N11、N13、N14 节点上各接入一组光伏电源，在 N7、N14 节点上额外接入一组风机。本算例考虑较高的分布式电源渗透率，日总负荷 747.874 MW·h，分布式电源日输出总功率 312.861 MW·h，出力占比达 41.83%，以光伏发电为主，具有明显的昼夜波动性。在本案例中不引入系统拓扑结构变化，只考虑辐射式供电模型，断路器 S₁、S₂ 处于常断位置。具体网络参数见参考文献[15]。

有载调压变压器 T₁ 分接头初始处在的位置 -1，变压器 T₂ 分接头初始处在位置 0，变压器具体参数如下表所示。

表 变压器 T₁、T₂ 参数

变压器	连接方式	变比 /kV	分接头最大位置	单步调节能能力
T ₁	3-ph Dyn1	110/20	-10~10	1%
T ₂	3-ph Dyn1	110/20	-5~5	1%

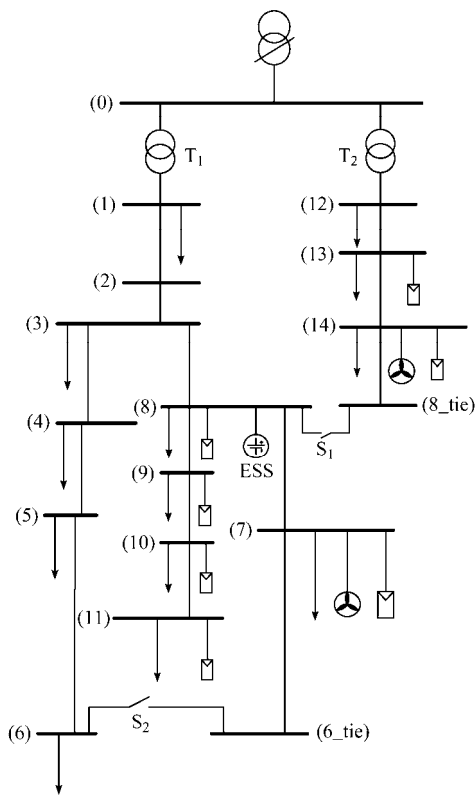
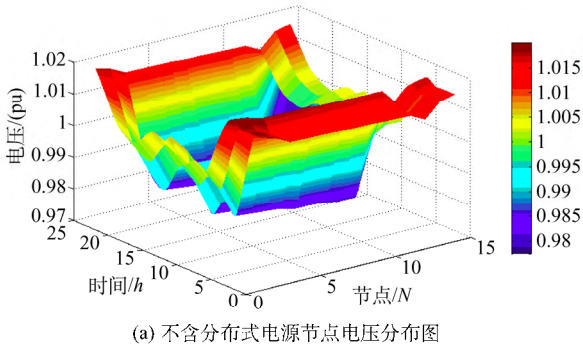
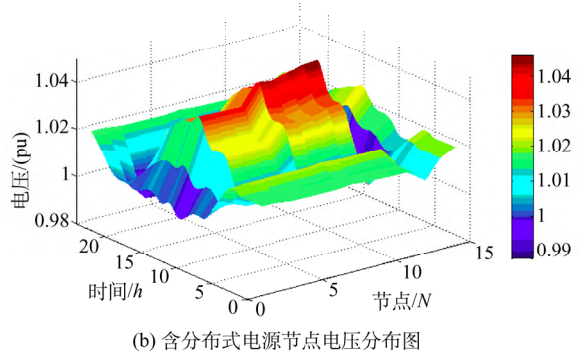


图6 CIGRE 14节点典型中压配电网

分布式电源接入系统前后，电压分布如图7a、7b所示。由于分布式电源出力的波动较大，N7~11节点在中午时刻电压越限严重。



(a) 不含分布式电源节点电压分布图



(b) 含分布式电源节点电压分布图

图7

3.2 双层电压协调控制仿真与分析

在 DlgSILENT PowerFactory 中实现上文提出的双层协调电压控制，在 N8 节点上接入 ESS。图8表示的是在双层协调电压控制下的节点电压分布图，从图中可以看出节点 N7~11 在双层协调电压控制下的电压幅值得到限制，没有出现电压越限的情况，满足电能质量的要求；同时可以看出，由于断路器 S1 断开，N13~14 节点电压在传统的 OLTC 控制下相对其他节点电压波动较大，在中午时刻光伏出力最大时，节点电压也偏高。

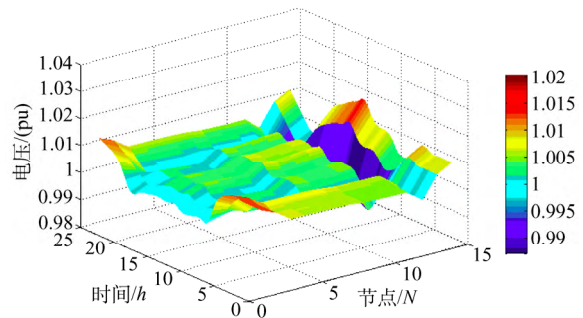
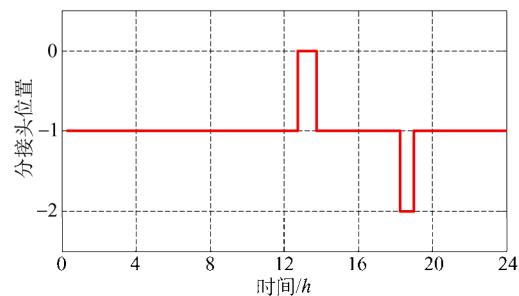
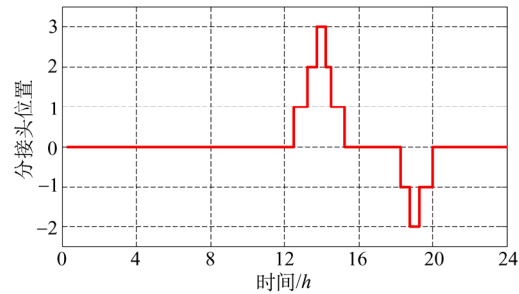


图8 双层协调电压控制下含分布式电源的节点电压分布图

图9a、9b表示控制方案下变压器 T₁、T₂在24 h内变压器分接头动作过程。通过使用含 ESS 的双层协调电压控制方法，变压器 T₁ 分接头的动作次数相比 T₂ 明显减少。



(a) 变压器T₁分接头位置图



(b) 变压器T₂分接头位置图

图9

仿真结果表明,双层电压协调控制有以下优点:①优化分接头的动作控制,使其满足较少的动作次数和较小的电压应力,提高设备使用寿命。②通过 OLTC 与 ESS 的双层协调电压控制,对 ESS 发出充放电命令,平抑电压波动,具有更好的电压水平。③降低分布式电源接入时的网络损耗,引入双层协调电压控制前后的系统总损耗分别为 9.933 MW·h 和 9.716 MW·h,降低了 0.217 MW·h。

4 结束语

大规模分布式电源的接入显著影响配电网的电压波动及其控制,本文以有载调压变压器和储能系统为措施,分析与其在含分布式电源接入的配电网的调压能力,并进行改进,综合设计了一种有载调压变压器和储能系统的双层协调控制方法,并在 DIgSILENT PowerFactory 软件建模仿真,结论表明文章提出的双层协调控制方法可以有效调压、满足配电网电压控制目标,且对系统具有削峰填谷、降低损耗的作用,并能有效延长 OLTC 与 ESS 的设备寿命周期。

参考文献

- [1] 胡晓阳,王卫平,王主丁,等.一种实用的配电网无功运行两层优化方法研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(3):14-21.
- [2] 王佳兴,杨洪耕,王泽.含分布式电源接入配电网的电压暂降状态估计[J].电测与仪表,2015,04:36-41.
- [3] Nikolaos P. Voltage control In MV distribution networks with a large share of distributed renewable generation[D]. Holland: Delft University of Technology, 2014.
- [4] Ferry V. Voltage control and voltage stability of power distribution systems in the presence of distributed generation[D]. Sweden: Chalmers University of Technology, 2008.
- [5] Yashodhan A., Bikash P., Rabih J. Distribution voltage control considering the impact of PV generation on tap changers and autonomous regulators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1):182-192.
- [6] Novalio D., Biswarup D., Jaydev S. Coordination between OLTC and SVC for voltage regulation in unbalanced distribution system distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1):289-299.
- [7] 王成山,武震,李鹏.分布式电能存储技术的应用前景与挑战[J].电力系统自动化,2014,38(16):1-8.
- [8] 尤毅,刘东,钟清,等.主动配电网储能系统的多目标优化配置[J].电力系统自动化,2014,38(18):46-52.
- [9] Yahya R., Behrooz V., Hosein A. Effects of photovoltaic and fuel cell hybrid system on distribution network considering the voltage limits[J]. Advances in Electrical and Computer Engineering, 2010, 10(4):143-148.
- [10] Hallberg P., Alba J., Birkner P., etc. Decentralized storage: impact on future distribution grids [R]. Belgium: Eurelectric, 2012.
- [11] 王旭强,刘广一,曾沅,等.分布式电源接入下配电网电压无功控制效果分析[J].电力系统保护与控制,2014,42(1):47-53.
- [12] 李力,王亮,侯学勇,施雄华,陈松林,鞠平.基于智能电表的电网广域负荷建模方法[J].电测与仪表,2012,09:52-57.
- [13] 常铁原,汪洋,孙慧佳.具有电能质量监测功能的智能电表设计[J].电测与仪表,2012,12:74-77.
- [14] M. Thomson. Automatic-voltage-control relays and embedded generation II[J]. IEEE Power Eng. Journal, 2000, 14(3):93-99.
- [15] CIGRE. Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources: Technical Brochure[R]. Task Force C6. 04. 02, 2013.

作者简介

张阁(1987-),男,工程师,主要研究方向为新能源技术应用。

(收稿日期:2015-12-10) EA

(编辑:朱金凤)