

# Research on Analysis and Strategy of Voltage in Distribution Networks with Multi-Small Hydropower

Xiaoping Zhang<sup>1,2\*</sup>, Hui Chen<sup>1</sup>, Kelin Zhou<sup>1</sup>, Xudong Song<sup>1</sup>, Nanhua Yu<sup>1</sup>, Xiuchao Tang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co. Ltd., Guangzhou Guangdong

<sup>2</sup>Guangdong Provincial Key Laboratory of Smart Grid Technology, Guangzhou Guangdong

<sup>3</sup>North China Electrical Power University, Beijing

Email: \*356524939@qq.com

Received: Nov. 26<sup>th</sup>, 2015; accepted: Dec. 8<sup>th</sup>, 2015; published: Dec. 15<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Traditional operation mode of distribution network was altered with the integration of small hydropower in it, which causes the problem that the voltage of distribution network drops in dry season, increases in wet season, and the voltage fluctuates greatly with seasons especially at the end of the line. Analysis on voltage problem in distribution network in this paper draws the conclusion that in wet season, the voltage rises since the power flow contrary sends to the main network when the small hydropower station's generating capacity increases. This paper also presents a method of voltage control by changing the distribution network structure, combining the method of installing parallel compensating devices, which can improve the quality of voltage in distribution network.

## Keywords

Small Hydropower, Network Structure, Distribution Network, Voltage Control

---

# 含多小水电的配电网电压分析与控制策略研究

张晓平<sup>1,2\*</sup>, 陈 辉<sup>1</sup>, 周克林<sup>1</sup>, 宋旭东<sup>1</sup>, 余南华<sup>1</sup>, 唐秀朝<sup>3</sup>

\*通讯作者。

文章引用: 张晓平, 陈辉, 周克林, 宋旭东, 余南华, 唐秀朝. 含多小水电的配电网电压分析与控制策略研究[J]. 智能电网, 2015, 5(6): 276-284. <http://dx.doi.org/10.12677/sg.2015.56033>

<sup>1</sup>广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州

<sup>2</sup>广东省智能电网新技术企业重点实验室, 广东 广州

<sup>3</sup>华北电力大学, 北京

Email: 356524939@qq.com

收稿日期: 2015年11月26日; 录用日期: 2015年12月8日; 发布日期: 2015年12月15日

## 摘要

小水电以分布式发电的形式在配电网并网发电, 改变了传统的配电网的运行方式, 引起配电网枯水期电压偏低、丰水期电压偏高、线路末端电压随季节波动较大等问题。本文对含小水电配电网电压问题分析得出, 小水电的接入使配电网从无源网络变为有源网络, 由原来的单向潮流变为双向潮流, 当丰水期小水电发电量较大时潮流反送到主网中, 引起配电网电压升高。同时提出了通过改变网络结构并结合并联补偿的方法对电压进行控制, 改善配电网的电压质量。

## 关键词

小水电, 网络结构, 配电网, 电压控制

## 1. 引言

小水电作为一种清洁无污染、可再生且具有良好生态与社会效益的绿色能源, 其重要性日益突出。小水电的发展可以带动当地的经济社会发展, 缓解配电网用电不足现象, 改善生产生活条件, 同时还能促进节能减排, 促进绿色电网的建设。我国小水电发展已达到相当规模, 特别在国家提出节能减排、绿色科学发展的要求后, 小水电得到了更为迅速的发展。

小水电大规模并网发电使传统的配电网运行方式发生改变, 从原来的无源网络变为有源网络、单向潮流变为双向潮流。小水电多数为径流式水电站, 其出力变化受降雨量的影响。另外小水电一般从配电网的分支线末端接入, 早期建设的配电线路变为输电线路, 原来的配电线路在设计时由于未考虑到小水电的接入, 其输电距离较远, 线路线径小。随着小水电的接入, 配电网中电压、电网无功分布随着各季节降雨量不同、小水电发电量不同而波动, 这将影响用户侧的电能质量, 也给主网电压调节带来巨大挑战。

小水电配电网的电压问题主要体现为: 在枯水期且负荷较高时, 配电网中的小水电发电量不能完全提供给当地负荷, 因此主网需要向配电网输送一部分电力, 电能从主网向配电网传输并消耗, 配电网沿线电压逐渐降低, 这可能使线路末端电压过低; 丰水期且用电负荷较低时, 小水电发电量较高, 将有一部分电能从小水电输送到主网, 在富含小水电的配电网中, 有可能会使配电网沿线的电压升高, 甚至引起末端电压越限。

本文对含小水电配电网电压问题进行机理分析, 总结解决小水电并网电压问题的主要方法, 并通过在 MATLAB 环境下对含小水电配电网进行建模仿真, 提出一种通过改变网络结构及合理选择并联补偿的方法, 对配电网电压进行优化控制。

## 2. 小水电对电压的影响分析

由于小水电多数从配电网的分支线末端接入, 可以用一个简单的配电网的理想模型进行机理分析,

如图 1。其中， $U_0$ 、 $U_1$ 、 $U_2$  分别为各个节点的电压， $R_1$ 、 $R_2$ 、 $X_1$ 、 $X_2$  分别为各段线路的参数， $P_1$ 、 $P_2$ 、 $Q_1$ 、 $Q_2$  分别为各个节点的有功功率或无功功率， $P_s$ 、 $Q_s$  为水电站发出的功率。

计算过程中用电压降落的纵分量来表示各段线路的电压损耗。对于未接入小水电的原配电网，各段线路的电压损耗为

$$\Delta U_i = \frac{P_i R_i + Q_i X_i}{U_N} \quad (1)$$

其中  $U_N$  为额定电压。

线路的总的电压损耗为

$$\Delta U = \frac{(P_1 + P_2 + \Delta P_2) R_1 + (Q_1 + Q_2 + \Delta Q_2) X_1}{U_N} + \frac{P_2 R_2 + Q_2 X_2}{U_N} \quad (2)$$

节点 2 的电压为

$$U_2 = U_0 - \Delta U = U_0 - \frac{(P_1 + P_2 + \Delta P_2) R_1 + (Q_1 + Q_2 + \Delta Q_2) X_1}{U_N} - \frac{P_2 R_2 + Q_2 X_2}{U_N} \quad (3)$$

当节点 1 接入小水电，小水电功率为  $P_s + Q_s$  时，节点 2 的电压为

$$U'_2 = U_0 - \Delta U' = U_0 - \frac{(P_1 + P_2 + \Delta P'_2 - P_s) R_1 + (Q_1 + Q_2 + \Delta Q'_2 - Q_s) X_1}{U_N} - \frac{P_2 R_2 + Q_2 X_2}{U_N} \quad (4)$$

当节点 2 接入小水电，小水电功率为  $P_s + Q_s$  时，节点 2 的电压为

$$U''_2 = U_0 - \Delta U'' = U_0 - \frac{(P_1 + P_2 + \Delta P''_2 - P_s) R_1 + (Q_1 + Q_2 + \Delta Q''_2 - Q_s) X_1}{U_N} - \frac{(P_2 - P_s) R_2 + (Q_2 - Q_s) X_2}{U_N} \quad (5)$$

上式中  $\Delta P_2$ 、 $\Delta P'_2$ 、 $\Delta P''_2$ 、 $\Delta Q_2$ 、 $\Delta Q'_2$ 、 $\Delta Q''_2$  分别各种情况下 1、2 节点之间的线路损耗。

由于小水电发电量  $P_s + Q_s$  要比线路上的损耗大得多，在上式进行节点电压比较时可以将线路中的损耗忽略。比较(3)、(4)、(5)式节点 2 的电压可以得出，小水电接入配电网中会使配电网末端电压升高，而且小水电发电量不同时，电压升高程度不同。当小水电发电量大到一定程度时候，节点 0、2 之间的电压损耗为负值，末端电压比始端电压高，这就解释了小水电在丰水期发电量高时，配电网中会出现变电站母线电压偏高的现象。同时比较(4)、(5)式也可以看出，小水电在配电网中接入的位置也会影响配电网沿线电压，小水电接入位置越接近配电网线路末端，丰水期时线路末端电压升高程度越严重。

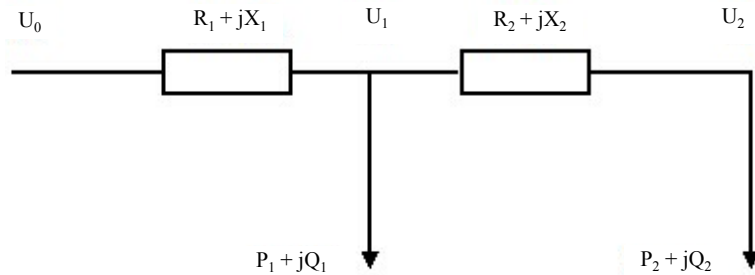


Figure 1. Ideal model  
图 1. 理想模型

在富含小水电的配电网中，当小水电大量接入时，电压变化情况越为严重，特别是丰水期小水电大量发电时，配电网中会出现多点电压升高现象，而且距离主网距离越远，电压波动情况越严重。

### 3. 解决含小水电配电网电压问题的主要方法

电力系统的电压优化控制需要同时考虑电力系统的安全性和经济性。目前已有对富含小水电配电网的无功和电压管理提出调整的措施 [1]，小水电并网的可靠性的研究 [2]等。另外还有从对水电站运行管理、建立科学合理的激励制度、运行规章和市场机制势角度改善电压问题的研究，文献 [3]设计科学合理的小水电激励制度，制定小水电专门立法，并给出完善小水电各项经济激励政策的具体建议。

富含小水电配电网电压优化控制主要有以下几种措施：

调节变压器分接头进行调压。在系统无功功率充裕的情况下，通过合理改变变压器电压比可以使系统不同的运行方式下电压偏移不超过允许波动范围。这种调压方式适用于小水电发电量和负荷变化较大、配电线路较长的情况。但频繁地调节变压器分接头容易造成变压器故障 [4]，而且有载调压变压器一般装设在枢纽变电站或者装设在大容量的用户处，因此在含小水电配电网中其使用受到一定限制。

对小水电功率因数进行考核。文献 [5]通过控制小水电的上网功率因数来对配电网中的无功潮流进行优化，降低配电网中的网损，改善电压质量。

改变发电机的机端电压调压。当系统中负荷增大时，电网中损耗增加，用户端电压下降，这时通过增加发电机励磁电流来提高发电机电压；当负荷减小时，用户点电压升高，这时减小发电机励磁电流以降低发电机电压。这种调压方法不需要增加额外设备，是最经济的调压措施。但是线路较长的情况下，单靠发电机调压不能满足远方负荷点的电压要求，还应采用其他调压方法。

应用无功补偿设备调压。当系统中某些节点电压偏低的原因是由于无功电源不足时，不能仅靠改变变压器变比实现调压，而必须在系统中电压较低点附近设置无功补偿设备。在富含小水电的配电网中，通常在丰水期时用并联电抗器补偿，防止丰水期电压水平过高；在枯水期时采用并联电容器补偿，提高线路末端运行电压。

应用线路电压调节器 [6]进行调压。这种调压方式可以用于解决长配电线路或者复杂配电网的调压问题，能够有效解决电压跌落和瞬时断电等问题，还能进行双向调压。但线路电压调节器会增加电网的损耗，而且价格较为昂贵，在投入使用时应综合考虑电网运行的经济性和安全性。

改变网络结构。由于有的小水电站在配电网形成之后才建成投产，这些小水电一般无序、就近接入配电网，当大量小水电无序接入配电网时，容易引起某个点或者多个点电压越限。改变网络拓扑结构可以一定程度上对小水电进行“有序”管理，还可以解决原网络输电线路参数选择不当的问题，从而缓解配电网电压问题。

实际中，单一的电压优化控制措施往往不能经济、有效地对电网电压进行控制。为了使配电网能够安全、经济运行，配电网的电压控制还需要根据实际配电网的运行特点、网络结构、负荷特性等合理采取几种电压控制措施进行综合控制。

### 4. 含小水电配电网的建模仿真

基于前文对小水电配电网的机理分析和电压控制方法，结合所研究如图 2 配电网的实际特点，本文利用 MATLAB/Simulink 提供的 SimPowerSystem 仿真工具箱，建立配电网整体模型，在枯水期、丰水期不同情况下，对原配电网进行分析。再通过改变网络结构，结合并联补偿手段控制配电网的电压。网络改变的方法为沿着甲线新建一条乙线，小水电站可以通过开关选择接到甲线或乙线上。乙线可以直接接入到陂头变电站、甲线中部或者甲线尾部。

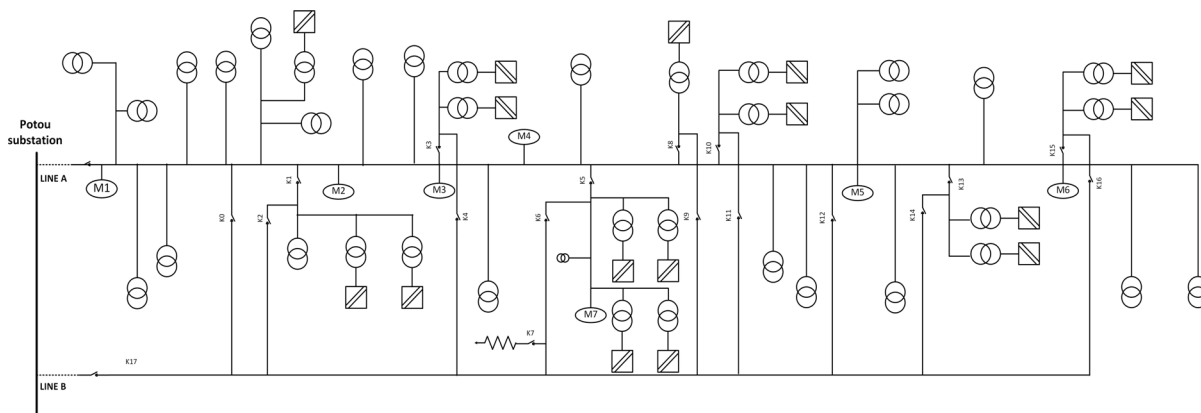


Figure 2. Distribution network structure

图 2. 配电网网络结构

对于配电网中的负荷和小水电,采用负荷静态模型将其当做 PQ 节点处理,其中小水电的 P、Q 取负值。其中 P、Q 根据各负荷和小水电站计量点测量的月用电量换算而得。在仿真过程中,输电线路采用  $\pi$  型等值电路。所研究配电网线路统一采用 LGJ95 型导线,各段线路长度根据牛岭甲线工程图纸中的网络结构、杆塔分布及线路总长度的出。图中的 M0 到 M7 为电压、电流监测点。仿真过程配电网网络结构的改变通过开关 K0 到 K17 来实现。

#### 4.1. 枯水期配电网仿真

选择枯水期时小水电发电量较小,负荷相对较大的月份的数据进行仿真。当小水电都接到甲线上时,对配电网进行仿真,配电网中的各个测量点的电压如图 3 所示。

由图可以看出在枯水期时,原配电网各监测点的电压都符合要求,因此在枯水期小水电发电量较小时原配电网能够运行在正常的状态下。

#### 4.2. 丰水期原配电网仿真

选择丰水期小水电发电量最大的月份的数据进行仿真。对于原配电网,小水电都接在甲线上,仿真测得各监测点的电压如图 4 所示。

由图可以看出,原配电网在丰水期时会出现电压多点越限且情况较严重,距离陂头变电站越远电压越限情况越严重。因此丰水期时必须采取措施降低配电网的电压,保证用户的安全、可靠用电。

同时仿真过程中通过对甲线上多个点的电压进行测量发现,丰水期时在 M7 点附近电压偏移最为严重。由于配电网中 M7 点附近有大量小水电接入,且该点附近的负荷相对较少,当小水电发电量较大时该点电压通常为配电网中电压最高的点。

#### 4.3. 丰水期改变配电网结构后仿真

丰水期将小水电都接到乙线上,乙线接到陂头变电站时对配电网仿真,得到各监测点电压数据如图 5。

丰水期将小水电都接到乙线上,乙线接到甲线的中部时对配电网仿真,得到各监测点电压数据如图 6。

由图 6 可见改变配电网网络结构后,丰水期配电网电压有所降低,图 5 情况下甚至可以使多数点的电压符合要求。但是还有某些监测点电压越限的情况,还需要采取进一步的措施控制电压。

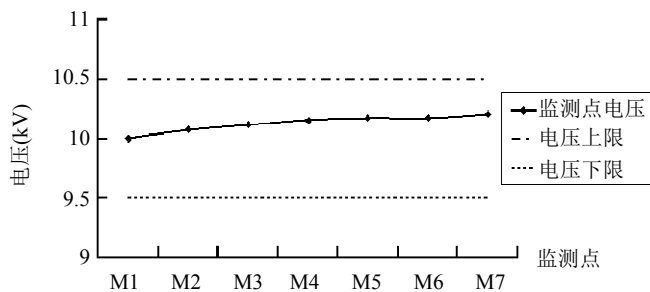


Figure 3. Voltage of the monitoring point

图 3. 监测点电压

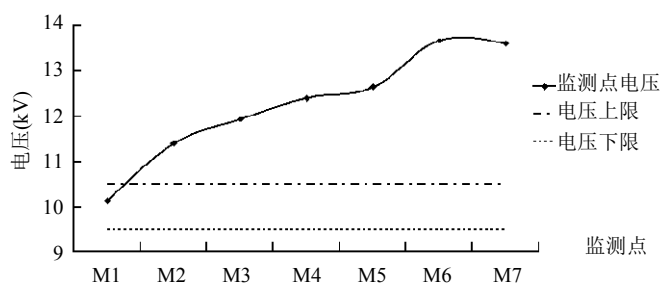


Figure 4. Voltage of the monitoring point

图 4. 监测点电压

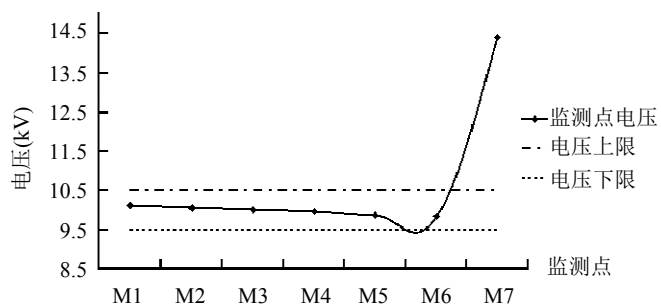


Figure 5. Voltage of the monitoring point

图 5. 监测点电压

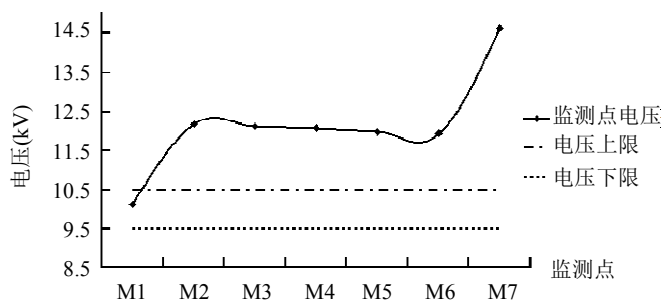


Figure 6. Voltage of the monitoring point

图 6. 监测点电压

#### 4.4. 改变网络结构且进行并联补偿后仿真

将小水电都接到乙线上，且乙线接到陂头变电站，在电压较高的点 M7 附近安装并联电抗器补偿，



补偿容量为 6.3 Mvar 时, 各监测点电压如 图 7。

将部分小水电接到乙线上, 且乙线接到陂头变电站, 在相同的位置进行补偿, 补偿容量为 5.8 Mvar 时, 各监测点电压如 图 8。

将部分小水电接到乙线上, 且乙线接到甲线中部, 在相同位置进行补偿, 补偿容量为 6 Mvar 时, 各监测点的电压如 图 9。

综上, 对于所研究的配电网, 在枯水期时原配电网中没有出现电压越限问题, 因此可以按照原来运行方式运行, 不需要改变小水电的接入方式或者采用并联补偿装置。

在丰水期, 对于原配电网小水电都接在甲线上, 甲线沿线电压逐渐升高, 电压严重越限。如 图 5, 图 6 为改变网络结构之后配电网中检测点电压情况, 可以看出将小水电集中接入到专线, 再接入到与主网连接的变电站或者甲线前端可以一定程度上减小电压越限问题。

图 7~9 仿真结果表明, 将部分或者全部线路母端的小水电经专线接入到与主网连接的变电站或者甲线前端, 再在配电网中电压较高点附近安装适当的并联补偿装置可以将配电网电压控制在合理的范围之内。

### 5. 对电压控制策略的评估方法

对于富含小水电的配电网, 电压问题突出, 在电压优化控制时要把电压质量作为重要考核指标。在此, 电压质量的考核主要考虑电压偏移。在实际配电网中电压优化过程中, 需将电压质量作为优化控制的重要指标, 同时还应该考虑电压优化控制过程的经济投入和网络损耗, 因此电压优化控制问题变成一个多目标的优化问题。

在丰水期时应将负荷点作为电压质量评估点, 用如 图 10 的电压偏差评估函数作为评价电压偏离程度的指标。将电网电压质量评估值用满意度  $F_{Div}$  表示, 1 为最优评估值 [7]。当电压偏移超过 10% 时其值为 0。

在保证电压质量的同时要将投资费用做为电压优化控制目标之一。主要的投资费用为无功补偿设备, 增加线路等产生的费用。用如 图 11 的线性的投资最优评估函数  $F_{Inv}$  来表示投资费用的满意度。当不投资时满意度为 1, 设当电压控制到都符合要求时投资满意度为 0.5。

保证电网电压质量的前提下还要减少功率传输中的有功损耗。用如 图 12 的评估函数  $F_{Loss}$  对网络损耗的满意度进行评估, 优化控制前满意度为 0, 当配电网网损最低时满意度为 1 (不考虑电压质量)。

综合考虑电压质量、投资及网损时, 需建立如下电压优化控制多目标模型:

$$\begin{cases} \text{Max } G(F_{Div}, F_{Inv}, F_{Loss}) \\ G = \alpha F_{Div} + \beta F_{Inv} + \gamma F_{Loss} \\ \alpha + \beta + \gamma = 1 \end{cases} \quad (6)$$

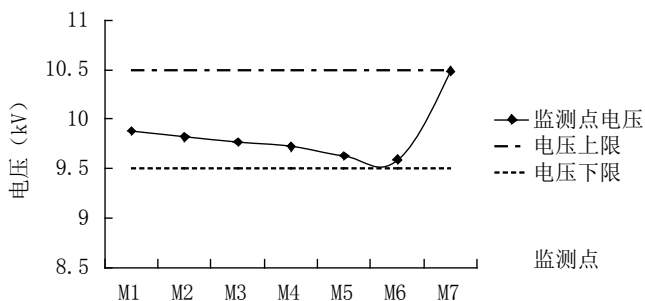


Figure 7. Voltage of the monitoring point  
图 7. 监测点电压

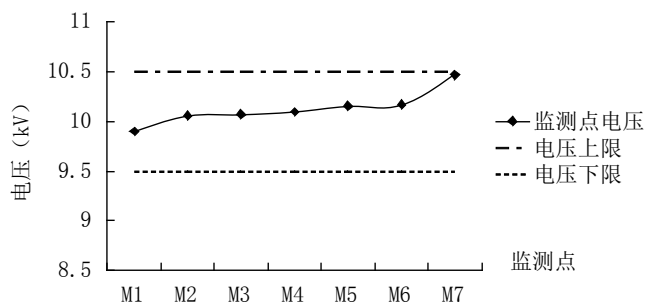


Figure 8. Voltage of the monitoring point

图 8. 监测点电压

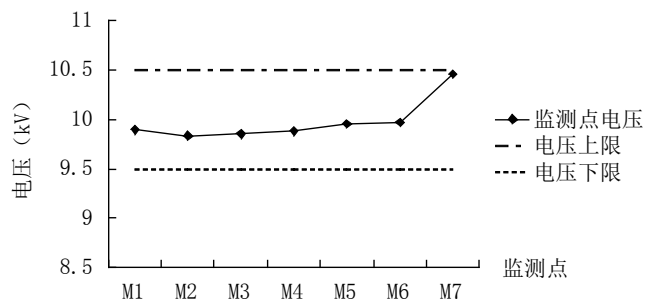


Figure 9. Voltage of the monitoring point

图 9. 监测点电压

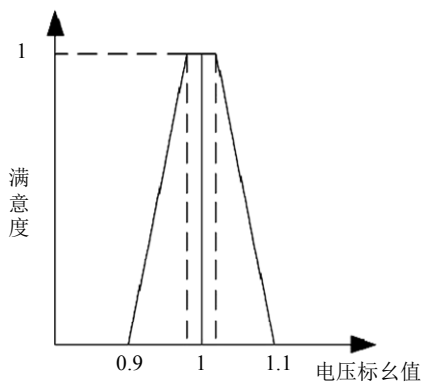


Figure 10. Evaluation function of voltage deviation

图 10. 电压偏差的评估函数

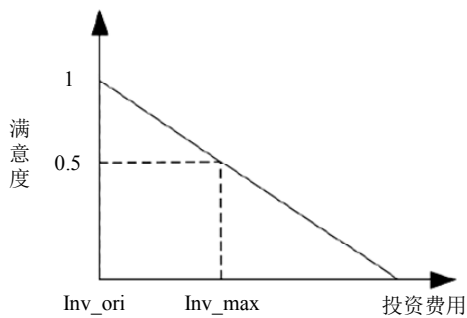


Figure 11. Evaluation function of optimal investment

图 11. 投资最优的评估函数



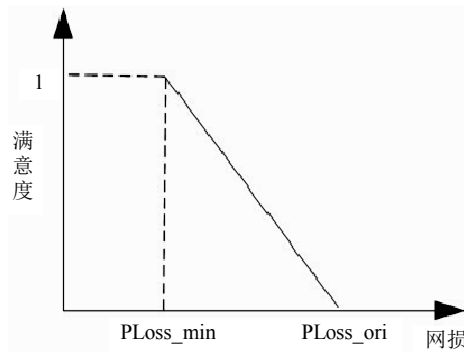


Figure 12. Evaluation function of the optimal network loss  
图 12. 网损最优的评估函数

此评估方法能够有效的兼顾各个目标的优化，将多目标问题就转化为了一个单目标问题，使得优化过程更加具有可操作性。在充分考虑到配电网电压质量的情况下，通过评估，可以尽可能减小投资费用，降低配电网网损，提高配电网运行的经济性。

## 6. 结论

小水电的迅速发展为当地带来不少经济效益，但同时也给配电网的运行带来新的问题。小水电接入配电网会使配电网从无源网络变成有源网络，原来的单向潮流变成双向潮流，配电网运行方式发生改变。当小水电发电量较大时潮流反送到主网中，引起配电网沿线电压升高，与主网距离越远电压升高幅度越大。本文还提出对配电网网络结构进行改变，并结合并联补偿对配电网电压进行控制的方法。仿真结果表明，适当改变配电网网络结构，合理选择并联补偿装置及容量可以降低丰水期时配电网电压，使电压能控制在合理的范围之内。

## 参考文献 (References)

- [1] 果莉, 刘德深, 赵玉林. 农村小水电无功出力对农网线损影响的理论分析及最优无功功率的计算[J]. 农村电气化, 1999, 22(2): 19-23.
- [2] 钱科军, 袁越. 分布式发电对配电网可靠性的影响研究[J]. 电网技术, 2008, 12(11): 32-35.
- [3] 秦建芝. 应对气候变化的小水电经济激励制度研究[J]. 生产力研究, 2011(10): 96-98.
- [4] 牛霞. 富含小水电电网的优质供电方案和评估方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [5] Hu, J.L., Zhang, Y., Guo, L. and Xie, H.F. (2006) Optimization of Power Factor for Operation of Small Hydro Stations. *International Conference on Power System Technology*, 2006, 1-5.
- [6] 林旭义, 黄伟君. 含小水电的 10 kV 线路电压质量改善新途径[J]. 浙江电力, 2010, 29(2): 59-61.
- [7] 史训涛. 富含小水电配电网的电压优化控制研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2012.