

小水电灵活并网控制技术研究

宋旭东^{1,2}, 余南华¹, 陈辉¹, 周克林¹

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510080; 2. 广东省智能电网新技术企业重点实验室, 广州 510080)

摘要: 小水电作为一种清洁无污染、可再生、具有良好生态与社会效益的绿色能源, 其重要性日益突出。小水电大多分布在山区地带, 其中多数小水电为缺乏库容调节能力的径流式水电站。由于山区 10 kV 馈线供电距离长, 沿线大量小水电的无序并网, 导致馈线电压经常性越限, 严重影响配电网的正常运行。提出一种灵活的网络控制方法, 利用调整小水电并网点的方法, 改变馈线潮流方向, 从而实现抑制馈线电压越限的效果。同时根据广东某地区的小水电线路案例, 设计了相应的算例进行仿真计算, 验证了所提出方法的正确性和适用性。

关键词: 小水电; 灵活网络; 电压水平; 并网控制; 馈线

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)02-0086-05

Research on the Flexible Control Technology of Small Hydropower for Grid Connection

SONG Xudong^{1,2}, YU Nanhua¹, CHEN Hui¹, ZHOU Kelin¹

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid, Co., Ltd, Guangzhou 510080, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of smart grid technology, Guangzhou 510080, China)

Abstract: As a clean non-polluting and renewable energy, small hydropower has great ecological and social benefits and its importance is increasing. Usually, Small hydropower is dispersed on mountainous regions. Most of small hydropower is run-of-river hydropower plant. The line voltage often leaps over the floor or ceiling following the varied output of small hydropower which is T-connected to the 10kV feeder disorderly. It seriously affects the distribution network's normal operation. In this paper, a control method based on flexible network is proposed to change the direction of the power flow and control the line voltage by adjusting the small hydropower's connecting position. Based on a region of Guangdong with rich small hydropower, a simulation case is established to verify the correctness and applicability of the method which is proposed.

Key words: small hydropower; flexible distribution networks; voltage level; grid connecting control; feeder

随着国内能源与环境问题的日益紧张, 我国将建设资源节约型和环境友好型社会作为国民经济和社会发展中长期规划的一项战略任务。电力行业作为国民经济发展中最重要的基础能源产业之一, 势必要大力提倡使用清洁能源, 建设绿色电网, 开辟低碳环保的电网运行模式^[1-2]。

小水电作为一种清洁无污染、可再生具有良好

生态与社会效益的绿色能源类型, 其重要性日益突出。小水电在解决农村用电、带动农村经济社会发展、改善生产生活条件、促进节能减排等诸多方面发挥了重要作用。我国的小水电资源丰富, 分布广泛。经过几十年的建设, 国内小水电发展已达到相当规模, 特别是在新世纪国家提出节能减排、绿色科学发展的要求后, 小水电得到了更迅速的发展^[3]。

小水电多存在于山区, 就近 T 接到 10 kV 馈线, 实现并网发电。然而, 山区负荷分散、负荷密度低, 变电站偏少, 使得 10 kV 馈线供电距离往往长达 10 ~ 20 km。而沿线并网的小水电根据雨量情况发电, 发电时馈线沿线电压偏高; 不发电时馈线末端电压偏低。因此, 10 kV 馈线电压水平随着小水电出力的变

收稿日期: 2015-04-05

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA05012)

作者简介: 宋旭东(1984), 男, 湖北武汉人, 工程师, 博士, 主要从事主动配电网、电力系统规划研究(e-mail)XudongSong_ee@163.com。

化呈现越上限或越下限两个极端,严重影响配电网的正常运行和沿线居民的正常用电需求。

为此,本文总结国内外小水电并网控制方法的基础上,提出了基于灵活网络的控制方法,解决小水电并网导致馈线电压越限问题,并通过仿真算例验证了其正确性和适用性。

1 小水电并网的特点

小水电以分布式发电的形式在配电网大规模并网发电,改变了传统的配电网运行方式,从原来的无源网络变为有源网络、单向潮流变为双向潮流,尤其是沿线电压分布不均和电压大幅波动的情况日益凸显。小水电电网主要有以下几个特点^[4]:

首先是系统布局不合理。由于目前许多农村配电网为树形延伸拓扑结构,整体结构并不完善。用电负荷增加时,电网上的消耗增加,故障率也增高。有些地方小水电的建设和发展在配电网形成之后,小水电一般直接就连接到已有配电网内,随着小水电的建设,原有的配电网线路当做小水电的输电线路来使用,由于导线截面不大,线路的损耗加剧,直接影响到小水电的经济效益及电能质量。

其次是继电保护装置不配套。地方小水电系统因设备简单,继电保护装置也较简单,一般均不设专门的继保机构,整个系统的继电保护从型式选择、整定计算以及各级之间的相互配合等的设计、安装、调试工作无专人负责。如果配电网的继电保护整定是在小水电投入使用之前进行,小水电投入后由于网络结构及潮流流向的改变,而原有的继电保护装置整定值没有及时相应调整,容易造成保护装置的误动、拒动或者越级跳闸等,造成不应有的停电。

此外,小水电在不同售电协议下,不受电网的统一调度管理,其相对独立的运行特征表现为“无序并网”行为,对现有配电网的稳定运行造成极大冲击。其中,小水电无序并网的电压控制问题成为实际运行控制和管理中的难点。电网的电压过高或者过低,容易引起潮流的不合理分布,导致整个电网的经济运行水平下降,还会影响用电设备的安全运行,很可能使设备损坏,电力质量下降,发电量降低等。在国家要求大力发展新能源的前提下,在小水电资源丰富地区,尤其需要对大量的小水电并网实现“有序”管理。

2 小水电并网问题及措施

2.1 小水电并网的主要问题

1)电压问题。由于小水电发电量受降雨量影响,不同季节发电量差异很大,而且如果出现负荷高峰时发电量较低、负荷低谷时发电量较高的情况,电压波动幅度尤为明显。常见的电压问题有:丰水期时变电所母线电压偏高;小水电接10 kV线路导致电压偏高;枯水期时长线路电压偏低;此外,小水电启停、故障也对电网电压造成冲击。

2)小水电机组无功问题。小水电站的功率因数高达0.98到0.99,其不发无功或者是无功发不出的现象普遍存在,且较为严重。

3)小水电监测不足问题。小水电不受电网统一调度管理,大量小水电无序并网使得配电网的电压问题难以控制,难以保证电能质量。

2.2 小水电电压问题机理分析

小水电接入配电网会引起原来网络结构的变化,从而潮流也发生变化。对一个简单的配电网的理想模型进行分析,如图1所示。

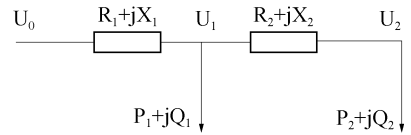


图1 简单配电网理想模型

Fig. 1 The Ideal Model of Simple Distribution Networks

为了简化计算,各段电路的电压损耗可用电压降落的纵分量来代替。在接入小水电之前,各段电路的电压损耗为

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

式中: 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

$$U_2'' = U_0 - \Delta U''$$

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

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。在比较小水电接入前后节点 2 的电压可以得出, 小水电接入以后, 节点电压被抬高了, 并且小水电的发电容量不同时, 节点电压的幅值是不同的。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。同时也可以看出, 小水电的接入位置对配电网的电压也会造成影响, 当小水电接入位置不同时, 线路总的电压损耗是不同的, 各节点电压也会相应的变化。

2.3 解决电压问题的主要措施

针对富含小水电配电网运行的复杂性及特殊性, 其电压优化控制主要的措施和手段包括: 调节变压器抽头、制定小水电功率因数考核指标、改变发电机的机端电压、应用无功补偿装置调节电压、应用线路电压调节器和更换线径大的线路等^[5-8]。

然而, 对于小水电无序并网所导致的电压问题, 从电网侧看, 目前的配电网网架以辐射形式为主, 覆盖面积广, 单纯采用专线并网必然造成网络结构进一步复杂、运行控制难度进一步加大的局面; 而由于线路沿线电压分布不均, 采用变电站集中调压的方式难以满足电压要求; 此外, 配置专门的电压调节设备也面临点多面广, 设备投入数量大的问题。从电源侧看, 间歇式能源分布式发电多为用户投资, 电网通过购电协议完成电力交易。因而, 电网对其没有直接控制权力, 难以通过众多小水电的协调运行实现线路沿线电压的合理分布; 同时, 小水电设备简单, 没有配置完善的电压协调控

制装置及相应的设备, 其无序并网行为容易对配电网的运行造成极大影响。因此, 在小水电无序并网地区, 单纯采用现有的电压调节方法难以现实配电网线路电压的有效控制。

3 小水电灵活并网控制技术

3.1 含小水电的馈线简化模型

根据 10 kV 馈线各支线上小水电和用户台区的实际情况进行分类如下:

1) C 类: 对于一个或几个相邻的用户台区, 可以忽略中间线段长度, 视为统一的用户台区节点。

2) S 类: 对于一个或几个相邻的小水电, 可以忽略中间线段长度, 视为统一的小水电结点。

3) X 类: 对于某条支线, 小水电与用户混合, 称为混合支线。一个或几个相邻的混合支线, 均视为一个统一混合的结点。

无论是 S 类、C 类或 X 类, 在不同时期、不同时间表现各不相同, 如表 1 所示。

表 1 馈线支线分类表

Table 1 The Classification Table of Feeder Branch

类型	描述	特点
C	功率吸收端, 消纳无功和有功	随着时间不同功率消纳力度不同
S	功率发生端, 释放无功和有功	随着时间不同, 功率释放力度不同
X	当 X 区域的 $C > S$ 时, 表现为 C 当 X 区域的 $C < S$ 时, 表现为 S	随着时间不同, 表现不同

无论是何种线路均可以表征为 C、S、X 的不同排列组合, 主要可分为集中型和混杂型两大类, 如图 2 和图 3 所示。

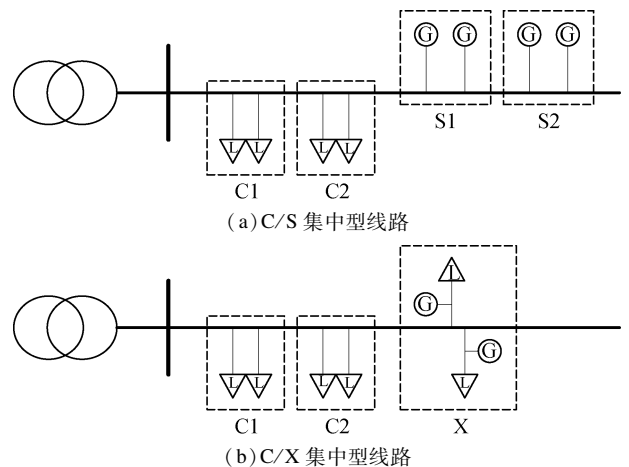


图 2 集中型线路简化模型

Fig. 2 Simplified Model of Centralized Feeder

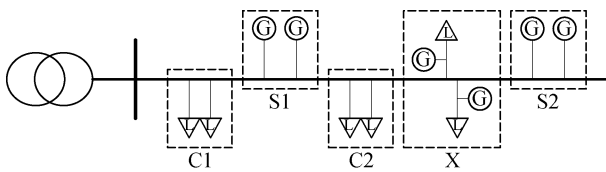


图 3 混杂型线路简化模型

Fig. 3 The Simplified Model of Mixed Feeder

3.2 基于拓扑变化的小水电并网控制策略

针对集中型馈线的小水电并网问题, 通过在变电站配置适量的电抗器进行集中补偿即可解决。而针对混杂型馈线的小水电并网问题, 则构建 C 类和 S 类的优化匹配模型, 通过分组优化计算确定最佳配置方案, 从而改变网络拓扑实现小水电的灵活并网控制。基于拓扑变化的小水电灵活并网控制的基本原理如下:

以图 3 为例, 在线路末端为 S2 端高功率无功小水电输出, 而在前段为 C1 端功率消耗端, 若 X 端表现为 S 特性, 则整条线路表现为后端电压过高。此时可以通过改变并网点的方式将原来的布局进行有序调整, 使源与荷优化匹配, 改变原有线路的潮流方向, 从而控制线路沿线电压将在规定范围内合理分布, 调整后的线路如图 4 所示。

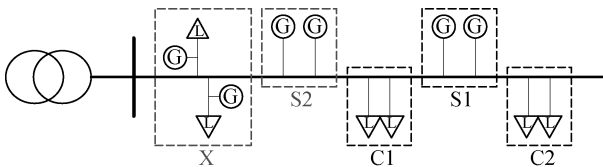


图 4 优化后的线路

Fig. 4 The Optimized Feeder

小水电的灵活并网控制策略为

$$P_t(C_i, S_j, X_k) = f(W_t, L_t, G_t, P_{t-1})$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} 0.95 U_N \leq U_i \leq 1.05 U_N \\ n_t \leq N_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P()$ 表示形成的各 C、S、X 的位置; $f()$ 表示控制函数; W_t 表示 t 时刻的雨量; L_t 表示 t 时刻的负荷量; G_t 表示 t 时刻的小水电出力量; P_{t-1} 表示 $t-1$ 时刻的各 C、S、X 的位置; U_N 表示馈线的额定电压; U_i 表示各考核点电压, 以 C 类为主; n_t 表示 t 时刻开关的动作次数; N_{\max} 表示 t 时刻开关的最大动作次数。

3.3 基于拓扑变化的小水电并网控制方案

通过一次线路建设和改造完成对小水电和负荷

分组的优化匹配控制, 最大程度实现小水电就近消纳, 综合解决小水电电压偏高问题。由该方法得出的控制方案包含几组控制模式, 对应网络拓扑变化的控制策略, 通过对负荷与小水电进行优化匹配, 实现小水电的就近高效消纳, 减少线路上的有功和无功传输, 在一定程度上抑制了线路电压偏高。该方案如图 5 所示。

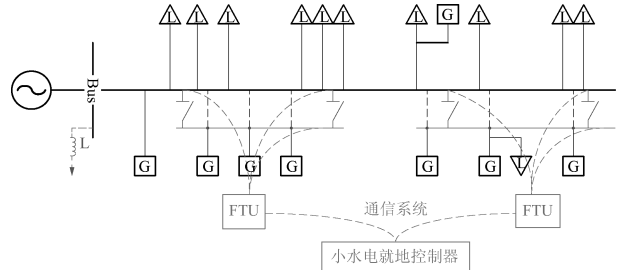


图 5 小水电灵活并网控制方案

Fig. 5 The Project of the Small Hydropower Flexible Control

4 仿真算例

根据广东某地区富含小水电区域电网的仿真算例。该区域包含 11 个等效负荷节点和 8 个小水电站节点, 其等效原理图如图 6 所示。

利用小水电灵活网络控制技术, 改变 HG4、HG5、HG6 和 HG8 的并网点位置(如图 7 所示), 通过网络拓扑的调整, 实现线路电压调节, 如表 2 所示。

表 2 优化前后线路电压对比

Table 2 The Comparison of Voltage Without and with Optimization

节点	调整前电压/kV	调整后电压/kV
N1	1.024	1.024
N2	1.039	1.04
N3	1.044	1.045
N4	1.05	1.036
N5	1.057	1.034
N6	1.052	1.038
N7	1.054	1.037
N8	0.9764	0.976
N9	0.9629	0.9621
N10	0.9463	0.9604
N11	0.9403	0.9695

5 结论

本文在分析小水电并网电压问题的基础上, 总结了当前主要的小水电并网电压控制措施存在的不足, 从而提出了基于灵活网络的小水电并网控制方

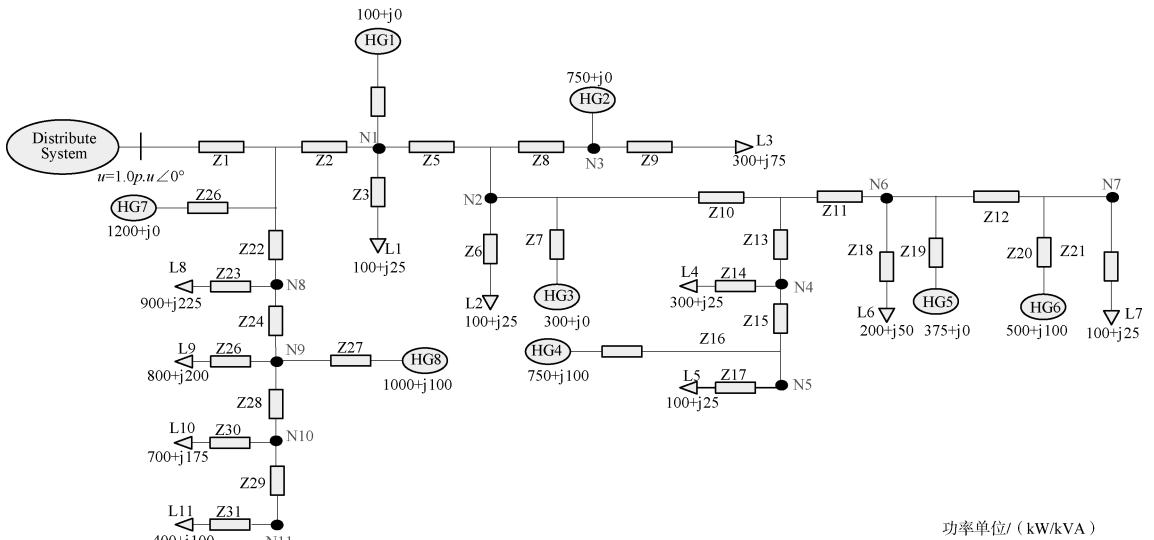


图 6 富含小水电的局部电网算例

Fig. 6 Simulation Example of Local Distribution Networks with Rich Small Hydropower

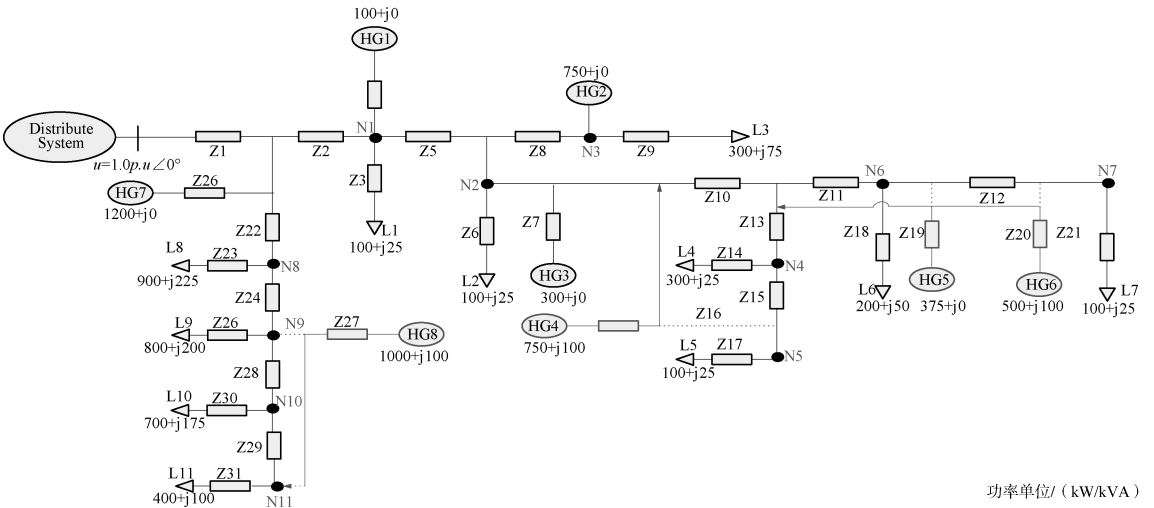


图 7 优化后的局部电网

Fig. 7 Optimized Local Distribution Networks

法及其相应的实施方案，并通过仿真算例验证了该方法的正确性和适应性，实现了对小水电无序并网的有序化管理，利用网络本身的调节能力缓解了电压越上下限的问题，具有重要的推广应用价值。

参考文献：

[1] 李世伟. 小水电上网对配电网的影响 [J]. 电气传动自动化, 2012, 34(4): 48-51.
 [2] 王海鹏, 袁荣湘, 范群英, 等. 小水电集中上网地区无功电压影响与分析 [J]. 中国农村水利水电, 2010(5): 155-157, 160.
 [3] 张粒子, 韩冰, 舒隽. 考虑不确定性的水电代理竞争市场均衡分析 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11): 39-43.

[4] 张洪兰. 小水电系统电压无功问题及控制方案研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
 [5] 金育斌, 李世伟, 李祥, 等. 小水电集中上网对甘南电网电压水平的影响分析和解决方案 [J]. 中国农村水利水电, 2012(11): 78-79.
 [6] 李劲, 唐捷, 张勇军, 等. 小水电群对配电网无功电压影响机理分析 [J]. 南方电网技术, 2012, 6(5): 39-42.
 [7] 乔蕾, 郭力, 张尧, 等. 基于最优潮流的分布式小水电无功考核方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(2): 88-93.
 [8] 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, 32(11): 74-78.

(责任编辑 黄肇和)