

Power Grid Control Method of Loss Reduction with Wind Power Integration

Honglin Guo¹, Wenying Liu¹, Wantong Cai¹, Fuchao Liu², Siqi Lv¹, Jingjing Zheng²

¹School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electrical Power University, Beijing

²Electric Power Research Institute, State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou Gansu

Email: guoredlin@163.com

Received: Dec. 11th, 2015; accepted: Dec. 23rd, 2015; published: Dec. 30th, 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

With the development of wind power, loss problems of large-scale wind power grid become increasingly prominent. First, combined with the actual grid conditions, we establish a model of large-scale wind power transmission system and select the main loss factors of the wind power. Then, starting from the loss formula, we simplify the power system model and loss expression, and fix the load-network-source coordination methods for reducing loss. Finally, we do some simulations to verify the correctness of power control method for reducing loss with the Gansu power grid as the background.

Keywords

Wind Power Integration, Power Grid Loss, Load-Network-Source Coordination

基于风电接入电网的降损控制方法

郭红林¹, 刘文颖¹, 蔡万通¹, 刘福潮², 吕思琦¹, 郑晶晶²

¹华北电力大学电气与电子工程学院, 北京

²国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州

Email: guoredlin@163.com

收稿日期: 2015年12月11日; 录用日期: 2015年12月23日; 发布日期: 2015年12月30日

摘要

随着风电的大量开发,大规模风电接入电网的网损问题日益凸显出来。首先,本文构建了一个有大规模风电接入的输电系统模型,结合电网实际条件,筛选出风电接入下的网损影响因子;然后,从网损计算公式出发,对电力系统模型及网损表达式进行化简,确定了荷-网-源协调降损的方法;最后,以大规模风电接入的甘肃电网为背景,通过仿真分析,验证了电网降损控制方法的正确性。

关键词

风电接入,网损,荷-网-源协调

1. 引言

近年来大规模新能源迅速发展,负荷侧响应也日益受到重视,这些新形势的出现给电网运行带来新的活力的同时也使得网损影响因子复杂化[1]。在荷-网-源间的协调控制方面,目前国内外研究较多的主要是源-网协调控制和源-源协调控制,源-网协调控制通常是在现有电源电网协同运行的基础上,通过新的电网调节技术,有效控制间歇性新能源大规模并网的不友好特性;源-源协调控制则是将间歇性电源和常规电源一起参与电网调节,使得电源朝着具有友好调节能力和特性的方向发展[2]-[4]。但是对于基于风电接入电网的降损控制方法研究甚少[5]。因此基于荷-网-源协调控制的降损方法研究非常有必要。本文对基于风电接入电网的降损控制方法进行了研究。在理论研究的基础上,结合甘肃电网的实际运行数据进行仿真计算分析,对理论分析的结果进行了验证。

2. 风电接入的输电系统模型及网损主要影响因子

评价电力系统的性能指标是安全可靠、电能质量和经济性[6]。本文假设风电并网后电网的安全性和电能质量均可得到保证,主要考虑电网运行的经济性,即以降低网损为目标进行研究。

如图1所示,线路0-1-2-3为一条超高压电压等级的输电网线路,线路两端连接区域电网, $P_{01} + jQ_{01}$ 、 $P_{12} + jQ_{12}$ 、 $P_{23} + jQ_{23}$ 分别为流经线路0-1、1-2、2-3段的功率大小,功率方向为0→1→2→3方向。大规模风电经升压后送到超高压输电网络,风电功率为 $P_w + jQ_w$;节点1处常规电源功率大小为 $P_1 + jQ_1$;节点2处高载能负荷功率大小为 $P_l + jQ_l$ 。

高载能产业是指能源成本在产值中所占比重较高的产业,在其产品价值构成中能源价值达到30%以上。从加工工艺上看,高载能产品的生产过程就是对加工对象(如矿石)施加能量的作用,如烧结、熔融、电解、合成,以改变其物质形态,通过分离、提取或合成形成高载能产品[7]。高载能产业的工艺特点决定了其对用电质量的依赖较小。通过实验发现,对于氯碱和电解铝等高载能产业,生产过程中的电压或电流波动只影响产品的产量,而不影响产品的质量、生产工艺和设备的正常运行。因而在电力系统中,高载能负荷具有良好的可调节、可中断特性,能够有效地响应和平抑大规模风电波动对网损造成的影响。

风电接入下,考虑调节图1母线2、3处常规电源、高载能负荷来降低网损,加之高载能产业建厂位置比较灵活,为便于分析,可将母线2、3合并。图1简化为图2,节点1处的下供(上供)功率大小为 $P_1 + jQ_1$ 。

网损计算公式:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R \quad (1)$$

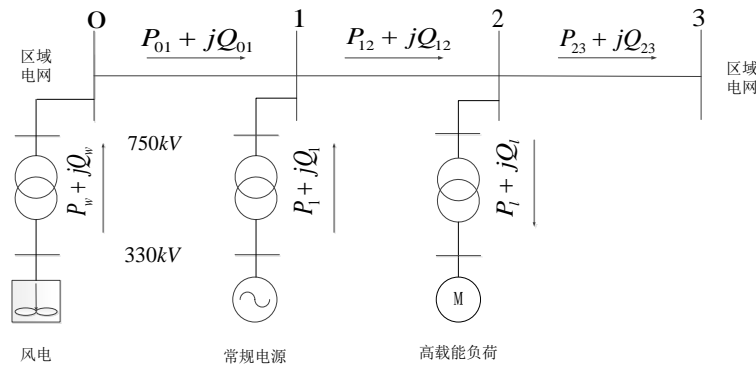


Figure 1. Grid model with wind power integration
图 1. 风电接入电网模型

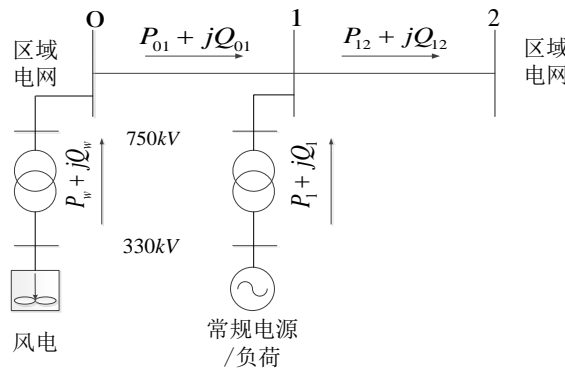


Figure 2. Simple grid model with wind power integration
图 2. 风电接入的简化电网模型

大规模风电接入系统前，系统总的网损为：

$$\Delta P = \frac{P_{01}^2 + Q_{01}^2}{U_{750}^2} R_{750/01} + \frac{P_{12}^2 + Q_{12}^2}{U_{750}^2} R_{750/12} + \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_{330}^2} R_{330/1} + \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_{330}^2} R_{T330} \quad (2)$$

考虑到高电压等级上线路电阻损耗远大于变压器损耗，忽略 330 kV 电压等级上变压器损耗，总网损 ΔP_0 为：

$$\Delta P_0 = \frac{P_{01}^2 + Q_{01}^2}{U_{750}^2} R_{750/01} + \frac{(P_{01} + P_1)^2 + (Q_{01} + Q_1)^2}{U_{750}^2} R_{750/12} + \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_{330}^2} R_{330/1} \quad (3)$$

大规模风电接入系统后，假设经过节点 0 下级支路注入到输电系统的风电功率为 $P_w + jQ_w$ ，系统总的网损 ΔP_1 为

$$\begin{aligned} \Delta P_1 = & \frac{(P_{01} + P_w)^2 + (Q_{01} + Q_w)^2}{U_{750}^2} R_{750/01} + \frac{(P_{01} + P_1 + P_w)^2 + (Q_{01} + Q_1 + Q_w)^2}{U_{750}^2} R_{750/12} \\ & + \frac{P_w^2 + Q_w^2}{U_{330}^2} R_{330/0} + \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_{330}^2} R_{330/1} \end{aligned} \quad (4)$$

为保证风电接入后系统功率平衡且网损尽量小，从有功角度，可以分为“源”、“荷”两方面来考虑：当 1 母线所接支路为常规电源， P_1 为正值；当 1 母线所接支路为高载能负荷， P_1 为负值。首先，在电力系统调度运行中，在短时间尺度上以电网运行的安全性为主要的控制目标；而在长时间尺度上，主

要考虑电网运行的经济性,也就是降损为主。常规电源,尤其是火电,其调节周期是 $T_G \leq 1 \text{ min}$,而高载能负荷的调节周期 $T_L \approx 1-4 \text{ h}$ 。因此在长时间尺度下,可调节1支路功率,跟踪风电功率变化,减小网损。

从无功角度来说,在长时间尺度下,主要从静态过程分析风电并网对电力系统的影响,不考虑动态元件的暂态过程。根据无功补偿装置的性质可知,电容、电抗器、变压器分接头的调整是长时间尺度完成的,而发电机、SVC、SVG的无功出力是短时间尺度完成的[8]。通常,风电场吸收无功,而且无功功率一般通过电容电抗器投切、变压器分接头的调整就地补偿,所以在无功补偿装置作用下,可以忽略无功功率 Q_w 。系统总的网损 ΔP_2 为

$$\Delta P_2 = \frac{(P_{01} + P_w)^2 + Q_{01}^2}{U_{750}^2} R_{750/01} + \frac{(P_{01} + P_1 + P_w)^2 + (Q_{01} + Q_1)^2}{U_{750}^2} R_{750/12} + \frac{P_w^2 + Q_w^2}{U_{330}^2} R_{330/10} + \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_{330}^2} R_{330/11} \quad (5)$$

3. 基于风电接入电网的降损控制方法

有功平衡和调度具有迫切性,需要通过远距离传输来实现,而无功补偿应当避免远距离传输,必须由本地或邻近的无功补偿装置来完成。因此,对于降损的协调性来说,无功功率相对有功功率处于次要的位置。

从有功角度,对于(5)式,风电出力发生改变,考虑调节1母线支路功率:风电出力增大,1母线支路减小常规电源发电或增加高载能负荷;风电出力减小,1母线支路增大常规电源发电或减小高载能负荷。始终保证风电变化量与源荷调节量相等,即 $P_w = -P_1$ 。在上述条件下,由(5)式与(3)式作差可以得到荷-网-源协调控制后的网损增值表达式:

$$\Delta P = \frac{2P_{01}}{U_{750}^2} (P_w R_{750/01} - P_1 R_{750/12}) + \frac{P_w^2 + Q_w^2}{U_{330}^2} R_{330/10} \quad (6)$$

由(6)式,在条件 $P_w = -P_1$ 下,若 $R_{750/11} = 0$,则网损增值 ΔP 最小。其实际意义为:在风电入网处有可供实时调节的常规电源和负荷,且调节量与风电改变量绝对值相等,即实现了有功的就地补偿。

考虑到在实际生产过程中,风电出力比会在某一区间内波动,本文假设在某一确定运行方式下,风电并网容量以实际出力比为界,高于此值为风电增发阶段,低于为减发阶段。将图2简化为图3。图中有意分出了一个送端和一个受端,送端和受端都有高载能负荷、发电机组,送端还有大规模风电(为便于分析,将受端风电并入下一级控制单元的送端)。这里考虑两个工况下的降损措施配合方法。不要使用空格、制表符设置段落缩进,不要通过连续的回车符(换行符)调整段间距。

由(1)式,简化系统网损为

$$\Delta P = \frac{P_{01}^2 + Q_{01}^2}{U_{750}^2} R_{101} \quad (7)$$

在风电增发阶段,输电断面输送功率过大,势必引起网损大幅增加,此时网损为(假设功率流向为0→1):

$$\Delta P = \frac{(P_{01} + P_w)^2 + (Q_{01} + Q_w)^2}{U_{750}^2} R_{101} \quad (8)$$

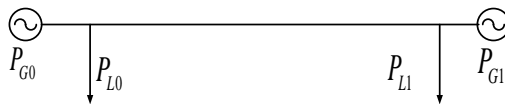


Figure 3. Simple transmission grid model with wind power integration
图3. 风电接入电网模型

在送端增加高载能负荷和减少常规电源，能够减少输电断面的潮流和网损，且与电网调峰需求相吻合。忽略风电无功对网损的影响，调节后网损表达式为：

$$\Delta P = \frac{(P_{01} + P_w - P_0)^2 + Q_{01}^2}{U_{750}^2} R_{l01} \quad (9)$$

若能保证风电变化量与源荷调节量相等，即 $P_w = P_0$ ，则(9)式简化为(7)式，风电造成的网损增加结果被完全消除。因前文假设忽略 330 kV 及以下线路网损，所以此时送端 P_{G0} 与 P_{L0} 单位改变量对于降损的作用几乎是相同的。

若在受端调节，为保证功率平衡，风电增发阶段，需增加高载能负荷和减少常规电源，调节方式与送端相同。若仍保证风电变化量与源荷调节量相等，即 $P_w = P_0$ ，则线路 0-1 流动功率变为 $(P_{01} + P_w + P_0) + jQ_{01}$ ，网损表达式为：

$$\Delta P = \frac{(P_{01} + P_w + P_0)^2 + Q_{01}^2}{U_{750}^2} R_{l01} \quad (10)$$

由(10)式减(7)式，可得受端调节与送端调节降损差值：

$$\Delta P = \frac{2(P_{01} + P_w)P_0}{U_{750}^2} R_{l01} \quad (11)$$

$P_w \neq 0$ 时， $\Delta P > 0$ ，即在受端调节降损效果不如送端好。因为在受端降损时，为保证功率平衡，需减小常规电源或增加负荷，进一步加大了线路 0-1 的传输功率，增大网损；而在送端降损时，直接降低新能源外送通道上输送功率的增加程度，降低新能源外送通道的线损，其降损效果远远好于受端 P_{G1} 和 P_{L1} 调节相同值的降损效果。

风电减发的时段，网损水平已经很低，电网降损的效果不如风电增发时段的降损效果明显。在满足电力系统有功平衡的基础上，此时应主要考虑满足高载能企业用电需求。因风电减发时用电成本增加，可适量切除高载能负荷。

4. 基于风电接入电网的降损控制方法仿真分析

4.1. 甘肃河西电网简介

河西电网位于甘肃西部的河西走廊，随着 2010 年底河西电网 750 kV 双回交流线输变电工程的投运，实现了西北主网与新疆电网的联网运行。河西电网形成了典型的链式长距离供电网络。随着酒泉二期风电的建设，河西地区风电规模逐渐扩大[9]。河西地区电网结构如图 4 所示。

4.2. 风电接入下“荷-网-源”协调控制对电网损耗影响的仿真计算

在 2014 年冬大典型运行方式下，甘肃河西地区负荷总量为 5867 MW，常规能源发电量为 4510 MW，风电总发电功率为 2240 MW(风电并网容量为 9046 MW)。由图 4 可见，大规模风电集中在敦煌地区，从甘肃主网来看，风电集群自西向东逐渐减少；高载能产业集中在酒泉地区，其他地区也在逐年发展。

选择拥有大规模风电以及少量常规电源的玉门地区作为送端；拥有火电、风电以及大批高载能产业的酒泉地区作为受端。送端接入 1000 MW 风电时(甘肃网损值为 347.377 MW)，分别在送端、受端减少常规能源 1000 MW，以保证电网总出力基本不变；分别在送端、受端增加高载能 1000 MW，以平衡因风电增发引起的网损增加。统计网损变化情况如表 1。

从仿真结果可以看出：送端调节相同容量高载能和常规能源对于降损的作用基本相同，降损效果远好于受端。

在风电减发的时段，网损水平已经很低，在满足功率平衡的基础上，不施加降损调节措施；在风电增发时段分别单独调节常规能源出力和高载能负荷，使 $\Delta P_G = \Delta P_w$ 、 $\Delta P_l = \Delta P_w$ ，降损效果如图 5 所示。

由图 5 可知，风电接入下，单独调节常规电源和高载能负荷都能有效降低网损。在风电出力不大于 30% 时，调节常规电源与调节负荷降损效果基本相同，调节负荷降损效果稍好于调节常规电源；风电出力为 30%~35% 时，调节高载能负荷降损效果明显好于调节常规电源。

在风电出力不大于 30% 时，常规电源与负荷能够在送端实现风电有功功率的就地消纳；风电出力为 30%~35%，风电厂附近的负荷能够实现风电有功的就地消纳，常规电源却不能，需要受端辅助送端协调降损。所以此时调节高载能负荷降损效果明显好于调节常规电源。

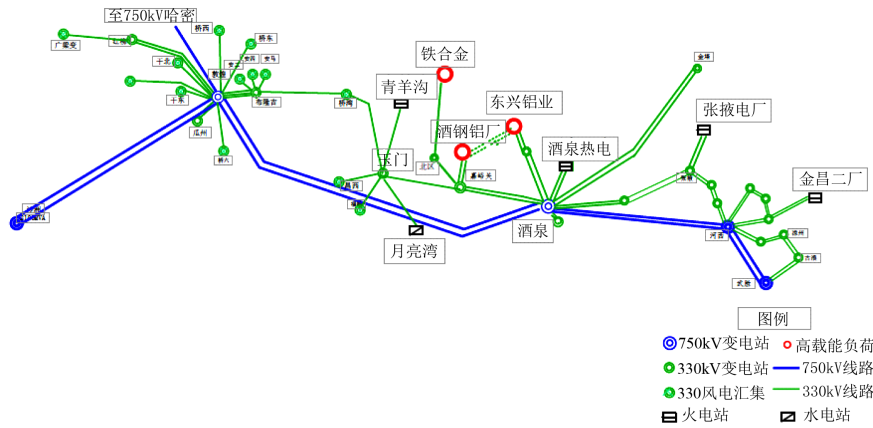


Figure 4. Electricity network wiring diagram of Hexi
图 4. 河西电网接线图

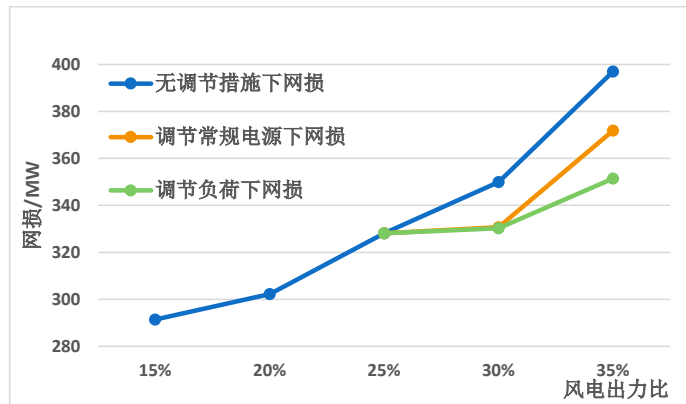


Figure 5. Curve: loss of Gansu with different wind power percent and adjustment mode
图 5. 不同调节方式下甘肃网损随风电出力比变化曲线

Table 1. Loss reduction of send/receive terminal
表 1. 送受端降损对比表

调节地区	玉门(送端)		酒泉(受端)	
	常规能源减少 100 MW	高载能增加 100 MW	常规能源减少 100 MW	高载能增加 100 MW
网损值(MW)	335.18	337.943	341.898	342.771
降损值(MW)	12.197	9.434	5.479	4.606

5. 结论

本文首先建立了风电接入下的简单电力系统模型, 分析并筛选出风电接入下的网损主要影响因子, 根据网损计算公式结合风电接入的电网模型, 研究提出荷-网-源协调降损控制方法。基于该方法进行仿真分析表明, 当风电增发时, 减少送端的常规能源出力、增加高载能负荷功率; 风电减发时, 网损率已经足够低, 此时可适当减少高载能负荷功率。

基金项目

国家科技支撑计划(2015BAA01B04)和国家电网公司重大项目(52272214002C)。

参考文献 (References)

- [1] 罗剑波, 陈永华, 刘强. 大规模间歇性新能源并网控制技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014(22): 140-146.
- [2] 刘文颖, 文晶, 谢昶, 王维洲, 刘福潮. 基于源荷互动的含风电场电力系统多目标模糊优化调度方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10): 56-63.
- [3] Soedibyo, Ashari, M. and Syahputra, R. (2014) Power Loss Reduction Strategy of Distribution Network with Distributed Generator Integration. 2014 1st International Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering (ICITACEE), Semarang, 8 November 2014, 404-408. <http://dx.doi.org/10.1109/ICITACEE.2014.7065780>
- [4] Veera Reddy, V.C., Perumal, N. and Rajasekharareddy, Y. (2004) Loss Reduction in Distribution Networks by Network Reconfiguration: A Two Stage Solution Approach. *Power and Energy Conference*, 29-30 November 2004, 241-246. <http://dx.doi.org/10.1109/pecon.2004.1461651>
- [5] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 杨争林, 宋晓芳. 智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统及其自动化, 2012, 36(21): 1-6.
- [6] 李庆民. 电网损耗计算与降损分析决策系统[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2011
- [7] 刘光华, 高智平. 甘肃加快发展现代高载能产业的思考[J]. 甘肃科技纵横, 2013, 42(5): 6-8.
- [8] 庄睿达. 基于无功补偿技术的低压配电网降损研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [9] 周海洋. 大规模风电送出功率对网损影响及控制措施研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2013.