

考虑无功功率协调控制的优化低频减载

郭 健

(国网攀枝花供电公司, 四川 攀枝花 617000)

摘要: 针对一个有较大无功功率剩余的受端孤立电网, 分析在低频减载切除有功负荷时, 发电机进相运行、电容器投切等无功控制手段对受端孤网低频减载的影响, 提出在低频减载过程中使发电机适度进相运行的同时控制电容器投切, 使用按电压切除电容器、按频率投入电容器的控制策略, 配合低频减载使系统频率在满足要求的情况下尽快恢复稳定。仿真结果表明, 对无功功率的适当控制能够有效提高孤立电网低频减载的有效性, 更有利于维持系统频率稳定和孤立电网的安全稳定运行。

关键词: 低频减载; 进相运行; 协调控制; 受端孤立电网; 频率稳定

Abstract: For an isolated receiving - end power grid with large surplus of reactive power, the influences of reactive power control methods, such as the leading phase operation of generator and the switching of capacitor, on under frequency load shedding in isolated receiving - end power grid are analyzed when under frequency load shedding removes active power. It is proposed that during under frequency load shedding, the switching of capacitor should be controlled while the leading phase operation of generator is moderate, and the control strategies in which the capacitor is removed according to voltage and the capacitor is put into operation according to frequency are used to cooperate with under frequency load shedding so that the system frequency can be resumed stable situation as soon as possible when it meets the requirements. The simulation results show that the proper control of reactive power can effectively improve the effectiveness of under frequency load shedding in isolated power grid and it is more useful to maintain the stability of system frequency and the safe and stable operation of isolated power grid.

Key words: under frequency load shedding; leading phase operation; coordination control; isolated receiving - end power grid; frequency stability

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2015)01 - 0051 - 04

电力系统频率稳定性是指电力系统受到严重扰动造成出力和负荷出现较大的不平衡时, 维持系统频率在可接受范围内的能力^[1]。对于小系统或孤网而言, 频率的稳定尤为重要^[2]。大电网通过联络线远距离外送大量功率, 一旦联络线发生故障而解列, 形成的受端孤网由于大功率缺额就会使频率严重降低, 甚至导致频率崩溃, 严重危害电力系统的安全运行。而低频减载作为电力系统第三道防线^[3], 是抑制频率下降、维持频率稳定的有效方法。

与大系统、大区域电网相比, 孤立电网有其自身的特点: ①系统中机组和负荷相对集中, 便于发配电的集中统一管理, 为在全局层次上的优化控制提供了现实基础。②系统的发电功率、机组投退可以实时测量, 通过记录扰动发生前各机组出力或联络线功率等数据, 可以实时识别出当前的功率缺额。③孤立电网一般是由地区电网与大电网发生解列故障

产生、满足异常情况下的负荷变化规律: 负荷变化的幅值大; 负荷的变化率大, 整个过程在瞬间完成; 负荷的变化是单方向, 不会自行改变方向^[4-7]。

目前的低频减载方案主要是采用按轮次逐次逼近的减载方式, 文献[3]在计算负荷减载量时, 往往只将负荷表示为频率的函数, 而忽略了负荷随电压的变化特性; 文献[9]根据母线电压的频率变化量或频率变化率来分级启动切除定量负荷; 计算确定的负荷减载量也以有功功率为主, 较少考虑无功功率^[7-11]。这种方案会对有较大无功缺额或无功剩余的孤立电网的低频减载造成很大影响, 容易出现过切、欠切等多方面的问题, 从而导致系统过电压, 有时甚至会导致电压崩溃事故。而随着电网的建设和发展, 超高压输电线路和电缆线路大量增加, 线间和线对地电容也相应增大, 系统重负荷时, 还会投入并联电容补偿, 当系统处于负荷低谷时, 就会造成无

功率大量过剩。因此,电容器投切是无功率的一种重要控制手段,另外,发电机进相运行是利用系统现有设备的一种调压手段,它可以吸收系统过剩的无功功率,通过控制发电机适当进相运行和电容器投切可以优化低频减载。

1 所研究的受端孤立电网

此处所研究的是参考文献[4]中例子,是一个因区域解列而形成的孤立电网,其发电出力2218 MW,负荷3156 MW。解列之前,该区域输入1197 MW有功功率,输出1008 Mvar无功功率,如图1所示。区域的发电由两个电厂组成,一个电厂为2台600 MW火电机组,供给1200 MW火电,满载运行于负荷极限。另一个电厂为6台200 MW水电机组,供给1018 MW水电。水电厂共有约180 MW旋转备用。

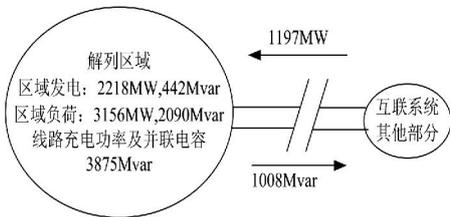


图1 电网解列前的潮流情况

根据文献[4]中参数,在 Simulink 中搭建仿真模型,其中负荷模型采用60%的电动机负荷+40%的恒定阻抗负荷。系统解列前处于稳态运行状态,1s时刻解列,形成无功功率过剩的受端孤立电网,孤立电网有较大有功功率缺额,旋转备用无法满足需要,必须采用低频减载才能维持系统稳定。

按照文献[3]中给出的低频减载方案,采用按频率分级减载,频率级差0.2 Hz,每级切除延时0.2 s,每级负荷切除量参见文献[3]。考虑暂态过程不同节点的频率差异,若系统有n台发电机,则由广域测量系统可得第i台发电机出口母线的电压的角频率 ω_i ,定义系统角频率为其惯量中心(center of inertia, COI)的等值角速度,即

$$\omega_{COI} = \frac{1}{T_{JT}} \sum_{i=1}^n T_{Ji} \omega_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中, $T_{JT} = \sum_{i=1}^n T_{Ji}$ 为第i台发电机的惯性时间常数。而系统惯性中心角频率与系统惯性中心频率的关系为 $\omega_{COI} = 2\pi f_{COI}$, 定义系统频率为系统惯性中心角

频率相应的频率,即 $f_{sys} = f_{COI} = \omega_{COI} / 2\pi$ 。考虑到所形成的受端孤网无功功率过剩,为防止无功功率进一步过剩,在低频减载时只针对有功负荷进行切除,不采用同时等比例切除无功负荷的方案。若不考虑针对系统无功功率进行控制,则可得系统频率曲线如图2所示。

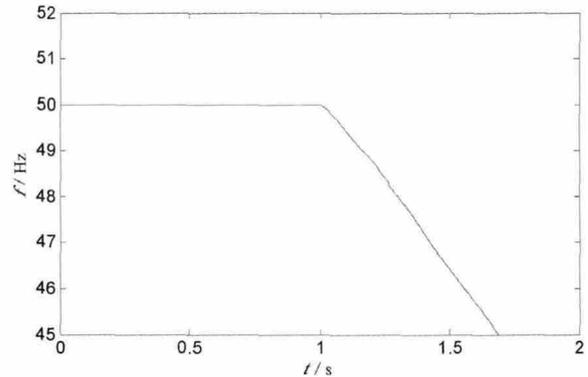


图2 不考虑无功控制的系统频率曲线

由图2可得,不考虑系统无功功率控制时,解列区域与互联系统解列后孤立电网频率一直下降到系统不允许的范围,系统频率失去稳定,造成“频率崩溃”。整个低频减载过程中,某一个电动机负荷母线电压及其所消耗的电磁功率如图3、图4所示。

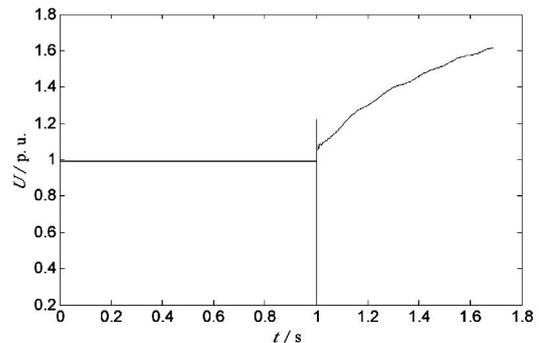


图3 电动机负荷母线电压

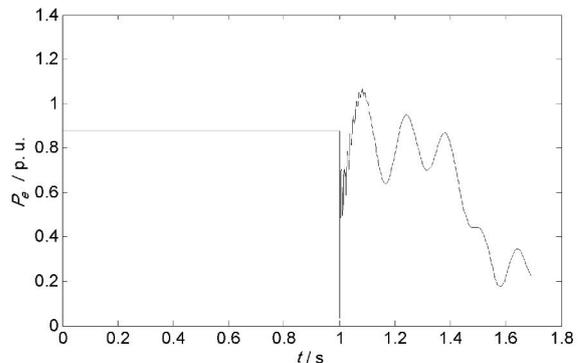


图4 电动机消耗功率曲线

由图3、图4可以看出,整个低频减载过程中,电动机负荷母线电压一直大于其额定电压,最大值达到额定电压的1.6倍。而正常运行时,电力系统

节点允许的最高运行电压一般不得超过其额定电压的1.1倍^[13]。电压升高导致电动机负荷在初始的减载过程中所消耗的电磁功率不仅没有下降,反而在振荡中超过正常运行时的功率,增大了负载,降低了系统低频减载的效果。同时,电压过高还会对系统设备以及负荷产生很大的不利影响,严重影响电力系统的安全运行。

2 无功功率协调控制的优化低频减载

2.1 发电机无功功率极限的限制对低频减载的影响

通过控制发电机励磁电流可使发电机进入进相运行状态。由文献[5]可知,限制发电机进相运行的因素主要有静态稳定极限限制和发电机定子端部温度的限制,所以发电机进相运行深度是有限的^[12]。这里为了说明发电机进相运行对低频减载的影响,暂不考虑限制发电机进相运行的因素,假设其进相运行时,最大能够吸收1.0 p.u.的无功功率。则通过调节励磁电流使火电厂、水电厂各一台机组进相运行,得到只考虑发电机进相运行时其中一台火电机组发出的无功功率曲线如图5所示,系统频率曲线如图6所示。

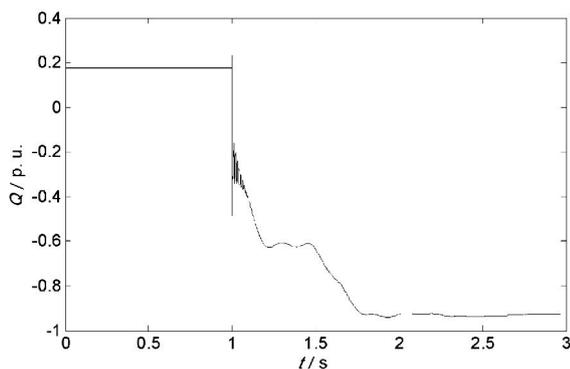


图5 发电机发出的无功功率曲线

由图5、图6可知,只考虑发电机进相运行时,即便不考虑进相运行的约束,能够吸收接近于1.0 p.u.的无功功率,解列区域系统频率还是无法恢复稳定,在与互联系统解列后孤立电网频率一直下降到系统不允许的范围之内直至频率崩溃,失去稳定。整个低频减载过程中,某一个电动机负荷母线电压、电动机所消耗的电磁功率如图7、图8所示。

由图7、图8可以看出,整个低频减载过程中,虽然有发电机进相运行吸收无功功率,但是电动机负荷母线电压仍然一直大于额定电压,最大值达到

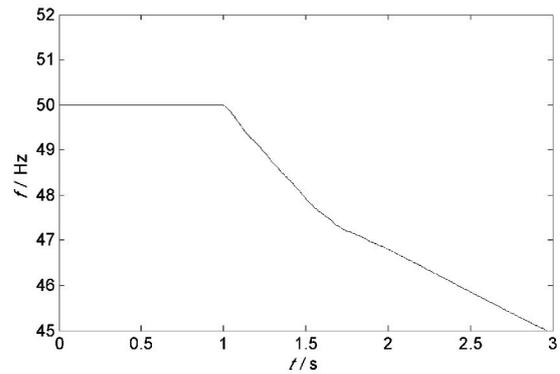


图6 只考虑发电机进相运行的系统频率曲线

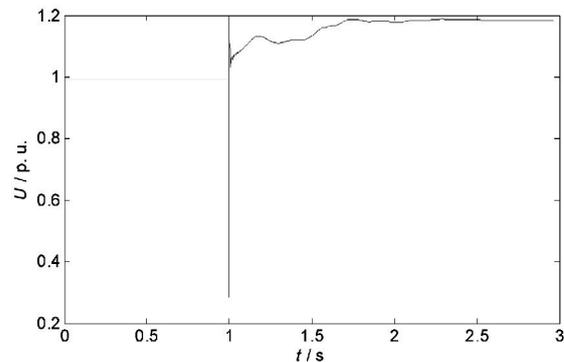


图7 电动机负荷母线电压

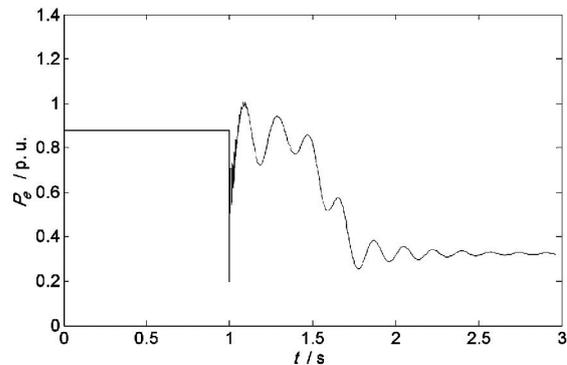


图8 电动机消耗的功率曲线

额定电压的1.2倍,比发电机不进相运行时要小,但是仍然超过正常运行时允许的最高电压,导致电动机负荷在初始的减载过程中所消耗的电磁功率不仅没有下降,反而在振荡中仍超过正常运行时的功率,增大了负载,降低了系统低频减载的效果。

2.2 电容器投切对低频减载的影响

由于仅靠发电机进相运行时,即便不考虑进相限制,也难以在有大量无功剩余时维持孤立电网频率稳定,而重负荷时的并联电容补偿是形成孤立电网后无功剩余的重要原因。因此在考虑发电机能够进相运行的基础上,考虑发电机进相运行的深度限制,限制进相运行时最大能够吸收的无功功率为0.35 p.u.^[13],进一步考虑电容器的投切对孤网频率稳定的影响。

由于无功过剩会产生过电压,因此这里引入并联电容器节点电压值作为并联电容器切除的启动条件。参照低频减载方案的设计,考虑电压变化的快速性,以及正常电压限制范围,以并联电容器电压的1.05 p.u.作为启动信号,分别延时0.05 s、0.2 s、0.5 s切除电容器。参考解列前的潮流情况,考虑发电机可以进相运行,但又只能浅度进相运行,设置总电容器切除量为1 000 Mvar。前两级每级切除300 Mvar,最后一级切除400 Mvar。按照此方案得到的系统频率恢复曲线如图9所示。进相运行火电机组发电机无功功率曲线如图10所示。

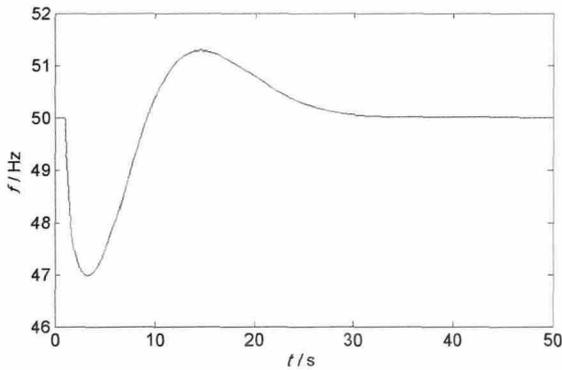


图9 系统频率曲线

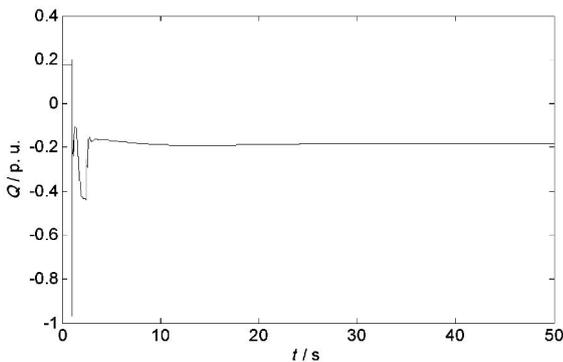


图10 发电机无功功率曲线

其中某一个电动机负荷母线电压曲线和电动机消耗的电磁功率曲线如图11、图12所示。

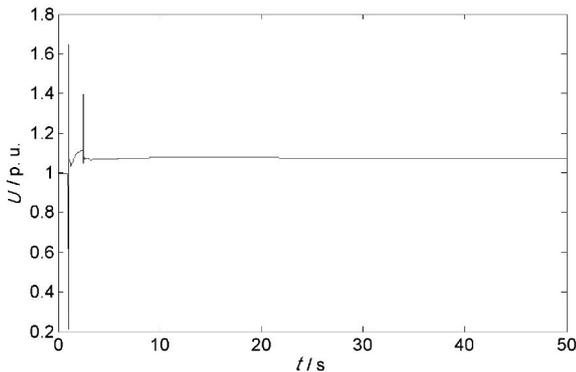


图11 电动机负荷母线电压曲线

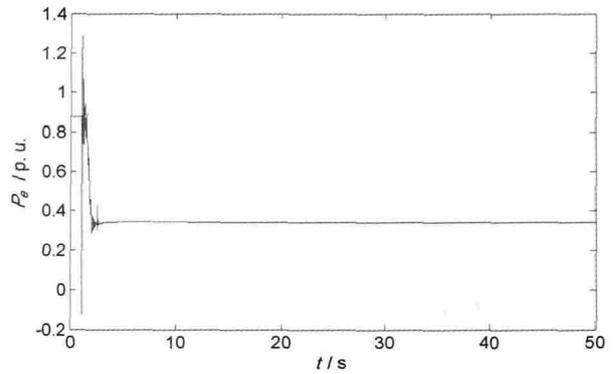


图12 电动机消耗功率曲线

由图9~图12可以看出,在满足发电机进相运行约束和切除部分电容器的情况下,低频减载可以维持系统频率稳定,并维持系统节点电压在允许范围之内。但同时由图9可以看出,系统频率恢复过程中,最高频率超过了51 Hz,已经超出了低频减载过程中要求的频率范围^[3]。因此,考虑在系统频率恢复后期重新投入部分已切除的电容器,电容器的投入使负荷节点电压升高,负荷消耗功率增大,就可以降低低频减载过程的最高频率。同样参考低频减载的设计,以系统频率达到50.5 Hz作为启动频率,分别延时0 s、0.5 s、2 s投入电容器,考虑电容器切除时最大一级切除400 Mvar,因此再投入时将第一级设定为200 Mvar,后两级每级设定为100 Mvar投入。为防止电容器重新投入后节点电压长期超过1.05 p.u.,会使电容器二次切除,检测系统频率变化率,在频率上升阶段闭锁电容器切除动作。得出系统频率曲线如图13所示,某一个电动机负荷母线电压如图14所示。

由图13、图14可知,系统频率恢复曲线在无功控制下已能够完全满足要求。频率恢复后期投入电容器后,电动机负荷母线电压略有上升,但只有1.1 p.u.,没有超出允许范围。

3 结 论

1) 在无功过剩孤立电网中,发电机进相运行和电容器投切是提高低频减载有效性的重要控制手段。

2) 电容器按电压切除、按频率投入,与低频减载合理配合能够获得较好的频率恢复特性。

3) 无功控制及其与低频减载配合的具体方案要根据实际电网具体制定。(下转第70页)

H. M. EL - Fouly. Optimum Microgrid Design for Enhancing Reliability and Supply Security [J]. IEEE Trans. on Smart Grid 2013 ,4(3) : 1567 - 1575.

[3] 池源. 含非线性及不平衡负荷的微电网控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学 2012.

[4] 周龙华, 舒杰, 张先勇, 等. 分布式能源微网电压质量的控制策略研究[J]. 电网技术. 2012 ,36(10) : 17 - 22.

[5] Blaabjerg Frede , Teodorescu Remus , Liserre Macro , et al. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics 2006 53(5) : 1398 - 1409.

[6] 张建华, 黄伟. 微电网运行控制与保护技术[M]. 北

(上接第54页)

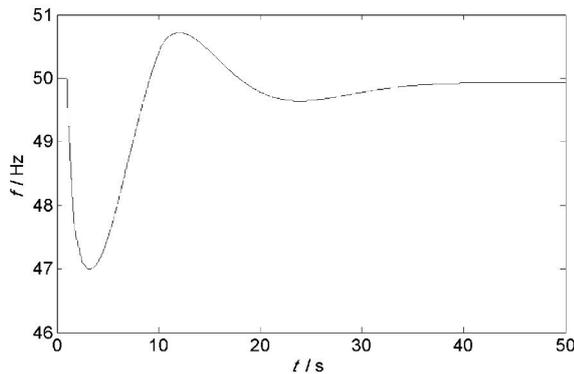


图13 系统频率恢复曲线

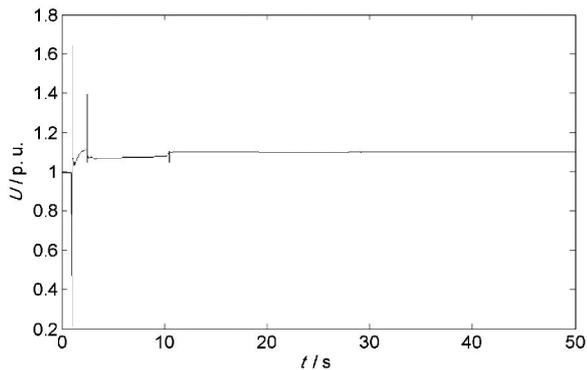


图14 电动机负荷母线电压

参考文献

[1] IEEE/CIGRE Joint Task Force. On Stability Terms and Definitions Definition and Classification of Power System Stability [J]. IEEE Trans. PWRS ,2004 ,19(2) : 1387 - 1401.

[2] Jonathan Horne , Damian Flynn and Tim Littler. Frequency Stability Issues for Islanded Power Systems [C]. IEEE PES Power System Conference and Exposition ,2004.

[3] 袁季修. 防御大停电的广域保护和紧急控制[M]. 北

京: 中国电力出版社 2012.

[7] Phongsak Phakamach , Chumphol Akkaraphong. An Optimal Feedforward Integral Variable Structure Controller for the Electrohydraulic Position Servo Control Systems [J]. Tencon 2004(4) : 459 - 462.

[8] 中国标准出版社. 电能质量标准汇编[M]. 北京: 中国标准出版社 2013.

作者简介:

朱云梦(1983) 研究方向为电力系统稳定与分析、分布式发电;

陈莎莎(1983) 研究方向为分布式发电控制;

母晓莉(1984) 研究方向为电力系统稳定与分析、分布式发电。 (收稿日期: 2014 - 09 - 02)

京: 中国电力出版社 2007: 141 - 175

[4] P. Kundur 著, 周孝信、李兴源, 等译. 电力系统稳定和控制[M]. 北京: 中国电力出版社 2002.

[5] Kottick D , Or O. Neural - networks for Predicting the Operation of an Under - frequency Load Shedding System [J]. IEEE Trans , on Power Systems ,1996 ,11(3) : 1350 - 1358.

[6] Luan W. P , Irving M. R , Daniel J. S. Genetic Algorithm for Supply Restoration and Optimal Load Shedding in Power System Distribution Networks [J]. IEE Proceedings - Generation , Transmission and Distribution , 2002 , 149(2) : 145 - 151.

[7] 王君, 王晓茹, 谢大鹏, 等. 孤岛系统的低频减载方案研究[J]. 电力系统保护与控制 2010 ,38(3) : 30 - 33.

[8] 何恒靖, 解大, 常喜强, 等. 基于割集的电力系统低频减载同调分区算法[J]. 电力系统保护与控制 2010 , 38(9) : 12 - 17.

[9] 秦明亮, 杨秀朝. 在频率紧急控制装置中扩充 df/dt 应用的探讨[J]. 电网技术 ,1998 22(6) : 39 - 41 45.

[10] 常喜强, 何恒靖, 解大. 计及频率差变化率的低频减载方案的研究[J]. 电力系统保护与控制 ,2010 ,38(4) : 12 - 17.

[11] Concordia C , Fink L H , Poullikkas G. Load Shedding on an Isolated System [J]. IEEE Transactions on Power Systems ,1995 ,10(3) : 1467 - 1472.

[12] 严伟, 陈俊, 沈全荣. 大型隐极发电机进相运行的探讨[J]. 电力系统自动化 ,2007 31(2) : 94 - 97.

[13] 王正风. 无功功率与电力系统运行[M]. 北京: 中国电力出版社 2009: 41 - 44.

[14] 杨传箭. 电力系统运行[M]. 北京: 水利电力出版社 ,1995: 26 - 36.

[15] 鞠平, 代飞. 电力系统广域测量技术[M]. 北京: 机械工业出版社 2008: 102 - 109.

(收稿日期: 2014 - 11 - 10)