

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.01.032

大电网末端风力发电系统故障穿越关键技术

李 晖¹, 马喜平², 董开松², 李金菊³, 沈渭程², 赵 耀², 李 臻²

(1. 国网甘肃省电力公司, 兰州 730050; 2. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 兰州 730050;

3. 甘肃省计算中心, 兰州 730030)

摘要: 为了了解大电网末端风电机组故障穿越特性, 文中分析了高渗透率风力发电大电网末端电网特性及风机运行特性。结合相应的检测标准及要求, 探讨了大电网末端风电并网出现的故障特性, 研究了直驱及双馈风电机组故障穿越关键技术及控制策略; 结合仿真及实际检测, 研究了大电网末端直驱风力发电机高电压穿越能力、双馈机组低电压穿越的可行性, 提出了风电机组故障穿越的隐患, 为大电网稳定运行提供了依据。

关键词: 故障穿越; 风电系统; 电压波动; chopper电路; 无功功率; Statcom

Research on Fault Ride Through for Wind Power System in the Terminal of the Power Grid System

LI Hui¹, MA Xiping², DONG Kaisong², LI Jinju³, SHEN Weicheng², ZHAO Yao², LI Zhen²

(1. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China; 2. Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou

730050, China; 2. Gansu Computing Center, Lanzhou 730030, China)

Abstract: In order to analyze the feature of the wind turbine fault ride-through in the terminal of the power grid, the paper analyzes the grid characteristics in the terminal of the power grid and wind power turbine operating characteristics of the wind power that has high penetration. Combined with the appropriate testing standards and requirements, discusses the fault characteristics caused by wind power combined to the grid in the terminal of the power grid, study the key technology of the fault ride through and control strategy of direct drive and double-fed wind turbines. Research the high-voltage through ability of direct drive wind power and low-voltage through feasibility of double-fed wind turbines in the terminal of the power grid, proposed risks of the wind turbines fault ride through.

Key words: fault ride through; wind power system; voltage fluctuation; chopper circuit; reactive power; Statcom

0 引言

随着电力系统的发展, 大容量、远距离、低能耗、占地省、经济性好的电能传输理念成为现代电力建设的渠道。针对中国能源资源分布不均和负荷需求布局的实际, 国家电网公司通过不断研发特高压输电通道的建设, 转变电网发展的方式, 积极推动电力发展方式转变, 进而促进中国能源和经济发展方式的转变。

对大电网而言, 有功和无功对电网的支持无疑是电网电压稳定的主要因素, 尤其是在中国大电网末端, 风力发电和光伏发电渗透率大, 因此, 通过电源点来调节有功和无功的输出是保证大电网运行稳定性的主要措施和保障。

跨区域的大电网建设也对电网运行安全性和可靠性提出了更高的要求, 尤其是中国西北电网, 地处大电网末端, 风力发电渗透率高。按照《甘肃省“十二五”新能源和可再生能源发展规划》, 预计到

收稿日期: 2016-08-10; 修回日期: 2016-09-20

基金项目: 国家能源局应用技术研究项目(522722130034); 国网甘肃省电力公司项目(522722160012, 5227221350BR)。

Project Supported by Application Research Project of National Energy Administration(52272214002Z), Science and Technology Program of State Grid Gansu Power Company(522722160012, 522721350BR).

2015年底,甘肃省风电装机总量将达到1 700万kW,太阳能发电装机总量将达到600万kW以上,大电网末端风电场运行的可靠性是现代电网运行稳定性的重要保证。目前,新疆与西北主网联网的750 kV第2通道工程是国家电网公司“十二五”规划建设的项目,也是西北750 kV主网架构建设的重要组成部分,更是实现新疆及甘肃省风电外送的重要通道。该工程项目的建成将加强西北750 kV主网架的建设,进一步强化新疆与西北主网的联系,提升风电外送的能力,为调整并且优化甘肃省的能源格局、加快清洁能源和新能源的发展,实现大范围资源的优化配置提供可靠的平台,从而进一步支持甘肃地方经济社会的快速发展。

随着大电网末端风力发电装机容量的不断扩大,风力发电在大电网的渗透率不断增大,风力发电机与局部电网之间的相互影响也随之扩大,为了维持电网运行的安全性和稳定性,大电网要求风力发电机必须具有故障穿越(fault ride through, FRT)的能力。这就要求在一定的电压波动范围内,风电机组能够不间断并网运行并且继续向电网输送功率,在故障切除后,各发电机组能够迅速恢复正常的运行,帮助电网恢复正常工作^[1-5]。

对于中国风力资源丰富的西北地区,电网构架薄弱,电网适应能力差,电压波动很大,见图1。目前,为了调节电网电压,风电场都投入了大量的SVC和SVG,这在一定程度上能够调节电网运行的稳定性。但是,SVC和SVG的投、切也会引起电网电压的波动,一些光伏电厂和风电场因为容性无功支撑不合理,频繁出现因电网电压过高而引起风机退出运行。因此,风力发电机的低电压穿越能力和高电压穿越能力是推进“坚强智能电网”建设的重要保障。

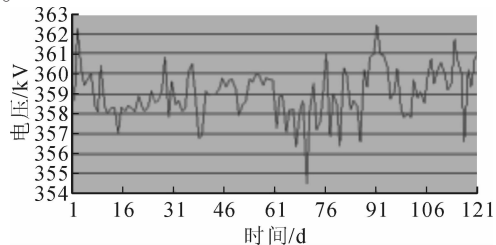


图1 330 kV 母线电压

Fig. 1 Grid voltage of 330 kV

目前,国内外集中研究风力发电机组低电压穿越技术特性,关于高电压穿越特性方面的文献比较少。电网发生电压跌落情况时,电网网侧变流器会出现过电流,为了保护网侧IGBT,变流器需要采取限流措施,直流侧母线电压会出现过电压,在整个

故障过程中,桨距角调节系统的动态响应时间通常在几百毫秒乃至秒级,因此,相对于很短时间内的电网故障,风电机组无法采用变桨系统来保障变流系统的安全性^[6-8]。文中通过分析风电机组故障穿越技术,利用制动电路提高风电机组故障穿越能力,阐述了机组在故障穿越过程中的关键技术。

1 风电系统标准对故障穿越能力的要求

造成电压波动的故障的原因不同,在电网故障中电网电压的抬升和降低幅值不同,持续时间也不相同。按照各个国家对电网运行稳定性要求不同,风力发电系统故障穿越的要求也不尽相同。因此,针对风机故障穿越的能力,风力发电渗透率高的国家制定了适应本国家电网故障穿越的标准。《国家电网公司风电场接入电网技术规定》对LVRT提出了相应的要求,但对风力发电机的高电压穿越没有相关的要求,见图2^[9]。西班牙、澳大利亚等风力发电发达的国家分别做了适应自己电网体系的相关标准,保证电网安全运行。

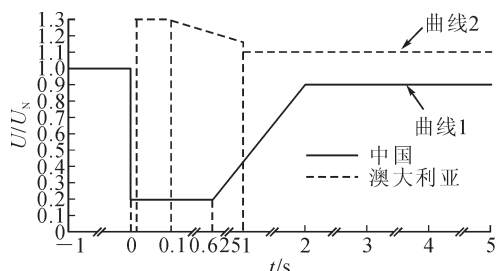


图2 电网公司的要求

Fig. 2 Grid company requirements

2 风力发电机组的拓扑结构及其工作原理

文中研究的双馈风力发电机和直驱风力发电机结构分别见图3、4。

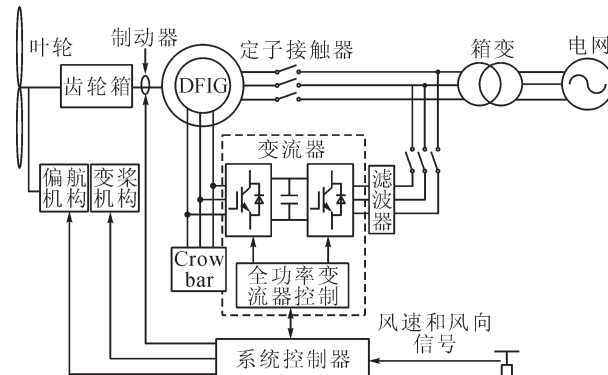


图3 双馈风力发电系统的拓扑结构

Fig. 3 Topology structure of double-fed wind power system

随着直驱风力发电机的发展,它的主要结构

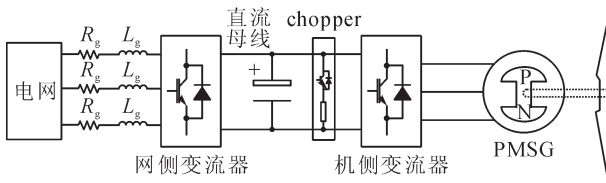


图4 直驱型风力发电系统的拓扑结构

Fig. 4 Topology structure of direct drive wind power system

是由不控整流、Boost、逆变器组成。由于发电系统的风力机与发电机转子直接耦合,发电机产生交流电,电流、电压和频率都是随着叶轮发电机转速的不断变化而变化的。因此,发电系统需要通过变频器转换成恒定频率的交流电再送入电网,逆变器通过内部 IGBT 的工作状态来调节输出的有功功率和无功功率,实现最大功率跟踪和最大效率利用风能^[10-11]。

双馈风力发电机定子直接挂在电网上,因此,电网电压的波动实时的影响风力发电机的输出。双馈风力发电系统主要结构是齿轮箱及变频器,因此,相对直驱风力发电系统,双馈风力发电更加复杂。

3 风力发电系统故障穿越的控制研究

通常,在系统单相接地故障时,非故障相就会出现暂时过电压现象;系统源、荷不匹配,负荷突然降低,SVC 和 SVG 的投切不合理及故障;系统可控串补、大型电容器开通与关断等都会导致电网电压过高。当风力发电系统馈线电压过高时,导致风力发电系统变频器直流母线电压升高,甚至超出直流侧电压上限,可能导致直流侧保护系统损坏,从而引起系统崩溃。因此,在网侧电压骤升时系统需要 chopper 电路保护,在故障发生时刻投切卸荷电路,解决系统功率不平衡的问题。

系统正常工作时,变频器直流母线电压基本保持平衡,制动电路不起作用,当电网故障时,直流侧两边功率不平衡,电压骤升,投入制动电路,也就是通常所说的 chopper 电路,消耗直流侧多余能量,抑制直流侧电压过高,保证电网运行可靠。制动单元的控制框图见图 5。

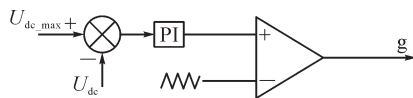


图5 制动单元控制框图

Fig. 5 Braking unit control block diagram

变频器直流母线电压通过和自身允许的最大直流母线电压值进行比较来控制 chopper 电路的

投切。目前,最常用的 chopper 电路为控制器加制动电阻,通过计算制动电阻需卸载的负荷来选择电阻类型^[12]。

在电网电压波动过程中,风力发电系统逆变器输入输出功率发生变化,因此:

$$\Delta P = \frac{1}{2} C \frac{d(U_{dc_max}^2)}{dt}; \quad (1)$$

$$\Delta P = \Delta U I_{dc_max}; \quad (2)$$

$$\Delta U = \frac{C}{2I_{dc_max}} \frac{d(U_{dc_max}^2)}{dt}. \quad (3)$$

式(1)-(3)中: ΔP 为输入输出功率偏差; U_{dc_max} 为直流侧母线电压最大值; I_{dc_max} 为直流侧母线电流上限。

电网处于正常运行状态下,风电机组处于恒功率因数运行状态,此时网侧变流器输出功率因数为零。当电网电压发生故障时,风电机组需要根据电压跌落的深度,在 75 ms 之内向电网补偿一定的无功电流,进而支撑电网电压,见式(4)。

$$I_{rea} = 2(1 - U_T) I_{N0} \quad (4)$$

式(4)中: U_T 为故障期间机组出口电压标么值,且有 $0.2 \leq U_T \leq 0.9$; I_N 为风电机组的额定电流。

对于直驱风电机组,这部分无功电流由网侧变流器提供。当电网电压不对称时,还需要考虑电网不对称程度对无功电流补偿的影响,式(4)可改写为

$$I_{rea} = 2 \left(\frac{1 - U_T}{1 - K_{unb}} \right) I_{N0} \quad (5)$$

式(5)中: U_T 为发生不对称故障期间机组出口处平均电压标么值; K_{unb} 为电压的不对称度,可用式(6)计算

$$K_{unb} = \sqrt{\frac{(U_{gd+}^2 + (U_{gq+})^2)}{(U_{gd+}^2 + (U_{gq+})^2)}} \quad (6)$$

式(6)中:上标+和-分别表示该矢量已经变换至正向和反向的同步旋转坐标系中;下标+表示正序分量;下标-表示负序分量^[13]。

网侧变流器主控制图见图 6。系统通常采用双闭环控制策略,逆变器控制方程,即

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = e_d - R i_d + \omega L i_q - u_d \\ L \frac{di_q}{dt} = e_q - R i_q - \omega L i_d - u_q \\ L \frac{di_0}{dt} = e_0 - R i_0 - u_0 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: d 轴电压为 u_d ; q 轴电压为 u_q ; u_0 为零序电压。

因此,可以得到系统空间矢量表达式,即

$$\begin{cases} u_d = u_{gm} \\ u_q = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中, u_{gm} 为电网相电压的幅值。

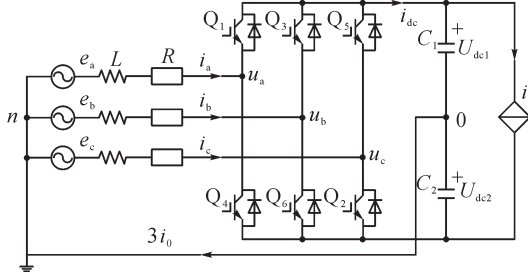


图 6 网侧变流器电路图

Fig. 6 Grid-side converter circuit diagram

通过电网电压定向的 d_q 分解法, 控制 $u_q=0$, 实现了电压的合成矢量 u 与 d 轴同相, 此时 $u_d=|u|$ 。

$$I_{dref} = \frac{Q}{3/2 U_s} \quad (9)$$

式(9)中: I_{dref} 表示无功电流; Q 表示无功给定; U_s 表示电网电压。

此时, 交流侧电压控制方程^[14-15]可表示为

$$\begin{cases} u_d = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_d^* - i_d) + \omega L i_q \\ u_q = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_q^* - i_q) - \omega L i_d + e_q \\ u_d = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_d^* - i_d) + e_d \end{cases} \quad (10)$$

在旋转坐标系下网侧变流器输入到电网的有功功率和无功功率分别可表示为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q) = \frac{3}{2} e_q i_q \\ Q = \frac{3}{2}(e_d i_q - e_q i_d) = -\frac{3}{2} e_q i_d \end{cases} \quad (11)$$

4 仿真分析及实验分析

结合上述分析, 并结合仿真及实验, 研究了直驱风电机组、双馈风电机组故障穿越技术。在 Pscad 中建立单机无穷大系统, 见图 7。

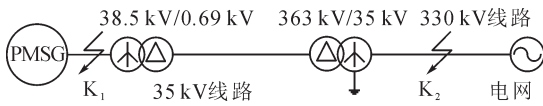


图 7 永磁直驱风电机组接入电网仿真模型

Fig. 7 The simulation model of permanent magnet direct drive wind turbines connected to the grid

永磁直驱风电机组依次经 35 kV 线路、330 kV 线路接入无穷大系统中, 其中 35 kV 线路采用 π 模型, 长度为 50 km; 330 kV 线路采用贝瑞隆模型, 长度为 100 km。该系统模拟了集电线路、风电机组出口和并网线路处出现的各种故障。

分别在风电机组出口、330 kV 线路风电机组侧母线处进行测量, 得到电压、电流的波形见图 8、9。

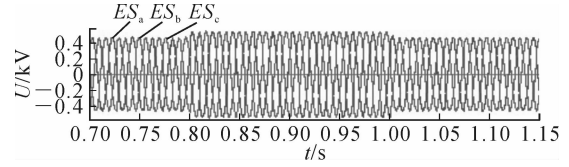


图 8 风电机组网侧电压

Fig. 8 Voltage of the wind turbine grid-side

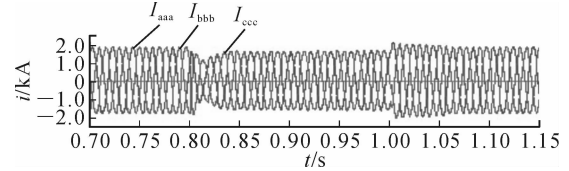
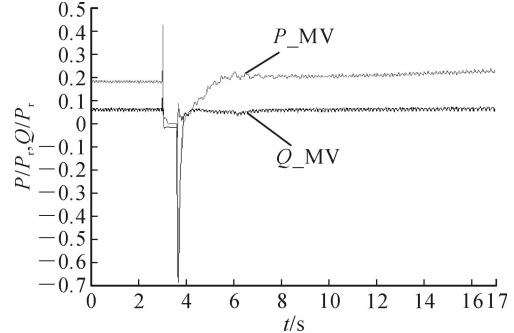


图 9 风电机组网侧电流

Fig. 9 Current of the wind turbine grid-side

从图 8、9 可以得到, 在 0.8 s, 当电网侧电压出现骤升时, 网侧电流并没有出现大的冲击电流, 在 1.00 s 时, 电网电压恢复正常, 同时, 网侧电流恢复正常, 整个系统稳定运行, 因此, 表明风电机组高电压穿越的可行性。

风电机组运行在功率 $0.1 P_n \sim 0.3 P_n$ 工况下, 三相 20% U_n 跌落时的中压侧有功功率和无功功率的波形图见图 10。由图 10 可见, 风电机组的状态为未脱网连续运行。

图 10 三相跌落时, $0.1 P_n \leq P \leq 0.3 P_n$ 工况下有功功率、无功功率波形图Fig. 10 Waveform of active power and reactive power under three phases drop and $0.1 P_n \leq P \leq 0.3 P_n$

由图 10(测试数据曲线)还可见, 电网电压跌落之前, 风电机组有功输出功率 $P_{MV} \approx 0.18$ p.u., 无功功率 $Q_{MV} \approx 0.02$ p.u.; 电压跌落瞬间, 有功功率最低为 $P_{MV} \approx 0.03$ p.u., 无功功率最低为 $Q_{MV} \approx -0.44$ p.u.; 电压跌落期间, 中压侧线电压跌至 0.225 p.u., 持续时间为 640 ms, 跌落期间风电机组有功功率 $P_{MV} \approx 0.02$ p.u., 无功功率 $Q_{MV} \approx -0.04$ p.u.; 电压恢复之后, 有功功率经过 0.62 s 恢复到 0.18 p.u. 并达到稳定。整个测试过程中风电机组的状态为未脱网连续运行。

图 11 为风电机组运行在功率大于 $0.9 P_n$ 工况

下,三相 $20\% U_n$ 跌落时的中压侧有功功率和无功功率的波形图,由图 11 可见,风电机组的状态为未脱网连续运行。

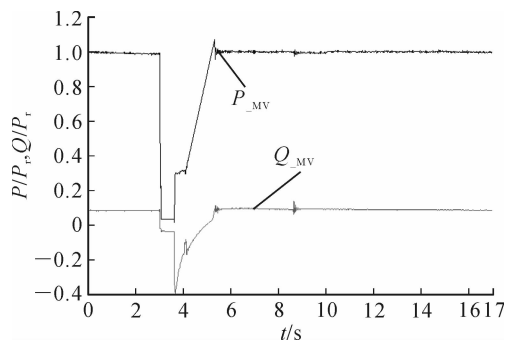


图 11 三相跌落 $20\%U_n$ 时, $P>0.9P_n$ 工况下,有功功率和无功功率波形图

Fig. 11 Waveform of active power and reactive power under three phases drop $20\%U_n$ and $P>0.9P_n$

由图 11(测试数据曲线)可见,电网电压跌落之前,风电机组有功输出功率 $P_{MV} \approx 1.0$ p.u.,无功功率 $Q_{MV} \approx 0.09$ p.u.;电压跌落瞬间,有功功率最低为 $P_{MV} \approx 0.05$ p.u.,无功功率最低为 $Q_{MV} \approx -0.4$ p.u.;电压跌落期间,中压侧线电压跌至 0.2 p.u.,持续时间为 640 ms,跌落期间风电机组有功功率 $P_{MV} \approx 0.3$ p.u.,无功功率 $Q_{MV} \approx -0.05$ p.u.;电压恢复之后,有功功率经过 1.9 s 恢复到 1.00 p.u.并达到稳定。整个测试过程中风电机组的状态为未脱网连续运行。

5 结语

通过仿真分析和实试验证了风电机组低电压穿越和高电压穿越的可行性。但是,结合仿真和实测,双馈风机在故障恢复瞬间会吸收最多 1.8 p.u.的无功,而直驱机组也会最多吸收 0.5 p.u.的无功。若在电压跌落程度较深、机组低穿特性同时率较高的情况下,这种现象可能导致电压难以恢复,进而可能导致风机大规模脱网。同时,在小风工况下,部分机组在低电压期间有功、无功发生剧烈的抖动。

参考文献:

- [1] 杜振华. 永磁直驱风力发电系统故障穿越技术的研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.
DU Zhenghua. Research on fault ride through for permanent magnet synchronous generator wind power system[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2012.
- [2] FATU M, LASCU C, ANDREESCU G D, et al. Voltage sags ride-through of motion sensorless controlled PMSG for wind turbines [C]//the 42th IAS Annual Meeting: Conference Record of IEEE. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2007:171-178.
- [3] YAO Jun, LIAO Yong, ZHUANG Kai. A low voltage ride-through control strategy of permanent magnet direct-driven wind turbine under grid faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 91-95.
- [4] GONG Qingqing, ZHU Ling, WANG Yi. Research on the control strategy of wind power system connected to grid based on PMSG[J]. Telecom Power Technologies, 2011, 28(1): 29-34.
- [5] FUCHS E F, MASOUM M A. Power quality in power systems and electrical machines[M]. Netherland: Elsevier Academic Press, 2008.
- [6] WESSELS C, FUCHS F W. High voltage Ride through with facts for DFIG based wind turbines[C]//13th European Conference on Power Electronics and Applications. Barcelona: EPE, 2009:1-10.
- [7] LI Jianlin, HU Shuju, KONG Deguo, et al. Studies on the low voltage ride through capability of fully converted wind turbine with PMSG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 92-95.
- [8] AHMAD A, LOGANATHAN R. Development of LVRT and HVRT control strategy for DFIG based wind turbine system[C]//IEEE International Energy Conference, Bahrain: IEEE, 2010:316-321.
- [9] GB/T 19963—2011 风电场接入电力系统技术规定[S]. 2011. GB/T 19963—2011 Technical rule for connecting wind farm to power system[S]. 2011.
- [10] PENG F Z, SHEN M S, HOLLAND K. Application of Z source inverter for traction drive of fuel cell battery hybrid electric vehicles[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2007, 22(3): 1054-1061.
- [11] MARTIN C, STAMEN J L. Analysis of electromagnetic coupling and current distribution inside a power module[J]. IEEE Trans. on Industry Application, 2007, 43(4):893-901.
- [12] 常勇, 徐政, 郑玉平. 大型风电场接入系统方式的仿真比较[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14):70-74.
CHANG Yong, XU Zheng, ZHENG Yuping. A comparison of the integration types of large wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14):70-74.
- [13] YUNUS A M, SIADA A, MASOUM M A. Application of SMES unit to improve the high-voltage-ride-through capability of DFIG-grid connected during voltage swell[C]//Innovative Smart Grid Technologies Asia (ISGT). Australia: Curtin University, 2011:1-5.
- [14] RIOUAL P, POULIQUEN H, LOUIS J P. Regulation of a PWM rectifier in the unbalanced network state using a generalized model[J]. IEEE Trans. on Power Electron, 1996, 11(3):495-502.
- [15] KHAN S I, YATIM A H M, IDRIS N R. Analysis and design of an unbalanced input three phase controlled rectifier[C]//Power Electronics and Drive Systems. Singapore: PIC, 1997:787-791.

李 晖(1965—),男,高级工程师,研究方向为系统接入设计。
马喜平(1987—),男,硕士,研究方向为新能源并网技术。