

风电接入对继电保护的影响(七) ——风电场送出电网继电保护配置研究

张保会¹, 原 博¹, 王 进¹, 王小立^{1,2}, 黄仁谋³, 吴伟明³

(1. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 宁夏电力公司调度中心, 宁夏 银川 750001;

3. 海南电网公司, 海南 海口 570100)

摘要: 开展大规模风电场并网送出电网继电保护实时数字仿真(RTDS)试验, 指出现有风电场送出电网继电保护存在的问题, 给出风电场送出电网保护配置建议: 110 kV 送出线路的主保护采用分相电流差动保护, 后备保护采用解微分方程算法的距离 I 段, 或将相量距离 I 段保护延时 0.15 s 动作, 同时配置常规距离 II、III 段及零序电流保护; 送出变压器主保护采用差动保护, 励磁涌流判据采用间断角鉴别、时差法等方法, 后备保护配置复合过电流保护及零序电流方向保护; 330 kV 送出线路主保护配置 2 套独立工作的分相电流差动保护, 采用电压突变量选相元件及基于零序分量的方向元件, 后备保护配置与 110 kV 送出线路相同。

关键词: 风电场; 继电保护; 保护配置; RTDS 试验; 模型

中图分类号: TM 614; TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.07.001

0 引言

现场的运行数据与学者的研究^[1-5]均表明, 风能发电集中接入区域电网与传统电网在故障期间的电磁暂态特性存在显著差异, 传统的继电保护设备在大规模风电场接入电网系统中无法保证快速、可靠动作。因此, 适用于大规模风电场送出电网的继电保护配置方案是我国风电制造厂家与电力系统运行、管理部门当前共同面临的亟待解决的课题。文献[6-11]系统指出当前风电场送出电网各保护元件的适用性, 本文基于风电场送出电网保护影响 RTDS 试验研究, 进一步具体给出了风电场送出电网保护配置建议, 旨在大规模风电并网后电网保护可以正确切除故障。

1 当前风电场送出电网保护配置

我国风能资源与用电负荷分布不平衡, 一般在风能比较集中的区域建立大容量风电场, 将风能转变成电能, 再通过远距离高压输电直接并入输入电网。西北某省的风电接入简图如图 1 所示。

随着并网风电容量的不断增大, 系统故障特征更加复杂, 其对输电系统继电保护元件带来的影响更加恶劣, 尤其是电力系统运行管理部门及继电保护厂家最为关心的 110 kV 送出线路保护和送出变压器保护、330 kV 送出线路保护等当前保护元件的

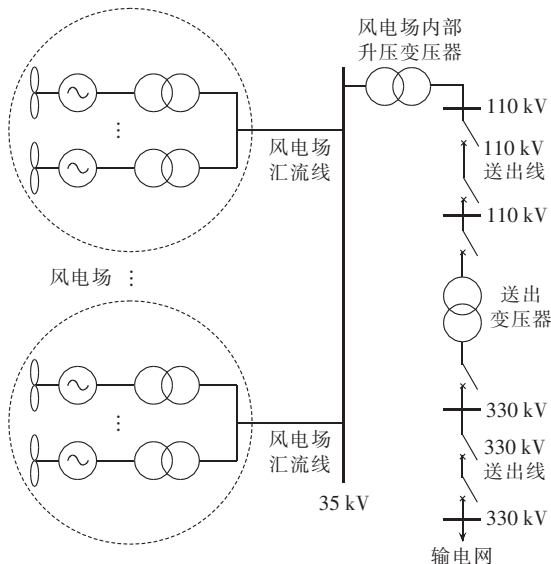


图 1 风电送出电网示意图

Fig.1 Schematic diagram of wind farm outgoing power grid
适应性及改进的配置方案亟待解决。

1.1 110 kV 送出线路保护配置

具有双侧电源的 110 kV 线路保护一般装设一套全线速动保护作为线路的主保护, 多采用分相电流差动保护以及零序电流差动保护原理, 后备保护装设三段式相间和接地距离保护, 并辅以零序电流保护用于切除经过渡电阻接地故障^[12]。

1.2 送出变压器保护配置

风电场送出变压器主保护采用双重化变压器差动保护配置。对于外部相间短路引起的变压器过电流, 变压器应装设相间短路后备保护, 一般采用过电流保护、复合电压启动的过电流保护或复合电流保护, 保护带延时跳开相应的断路器。对于自耦变压器和高、中压均直接接地的三绕组变压器, 增设零

收稿日期: 2013-05-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012-AA050201)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2012AA-050201)

序方向元件,方向指向各侧母线^[13-14]。

1.3 330 kV 送出线路保护配置

330 kV(或 220 kV)线路保护按加强主保护简化后备保护的基本原则配置和整定。主保护采用 2 套交流回路和直流电源彼此独立、可以快速动作切除全线路内各类型故障的全线速动保护,并且对于要求单相重合闸的线路,2 套主保护都应当具有选相功能。主保护主要有纵联电流差动保护、纵联距离保护、纵联方向保护。后备保护采用阶段式相间和接地保护(包括距离保护、零序电流方向保护),允许与相邻线路和变压器的主保护配合,从而简化动作时间的配合整定,同时应能反应线路的各种类型故障。

2 风电场送出对电网保护的影响

为研究大规模新能源接入对传统继电保护原理和保护动作行为的影响,西安交通大学于 2012 年 9 月组织了国内主要厂家,在开普国家继电保护及自动化设备质量监督检验中心对 110 kV、330 kV 线路及 330 kV 变压器部分继电保护产品进行保护动作性能 RTDS 测试。

2.1 试验系统

试验系统如图 2 所示。试验系统主要参数如下:等值系统短路容量 4580 MV·A;同步电厂装机容量 660 MW;风电 1 包含等值双馈式机组 49 MW、直驱式机组 45 MW;风电 2 包含等值双馈式机组 198 MW、直驱式机组 99 MW;风电 3 包含等值双馈式机组 148.5

MW、直驱式机组 49.5 MW;风电 4 包含等值双馈式机组 99 MW;光伏 1 容量 50 MW,光伏 2 容量 60 MW,光伏 3 容量 40 MW。

各个厂家保护装置安装于 110 kV 送出线 1、2,330 kV 变压器 1、2,330 kV 送出线 1、2 上。试验时,RTDS 将仿真的电压、电流数据等传送到继电保护装置,同时读取保护装置输出的断路器通断等信号,形成闭合试验。试验考察不同位置故障($K_1—K_{26}$ 故障点)、不同故障类型、不同风电运行工况条件下,各元件保护装置的動作性能。

2.2 新能源场站暂态模型

基于 RTDS 平台建立了各类型新能源机组电磁暂态详细模型,新能源场站故障暂态特性取决于其故障期间低电压穿越控制策略。

a. 双馈式风电模型。

为防止系统电压跌落期间变流器 IGBT 过载,双馈式风电在故障期间投入转子 Crowbar 短路电阻,同时闭锁变流器,并配合桨距角调限制输入机械功率的捕获。此时机组作为异步发电机运行,其励磁电流变成衰减直流,定子电流主要为故障前转速频率的交流分量,频率范围为 35~65 Hz。双馈式风电详细模型参见文献[15]。

b. 直驱式风电模型。

直驱式风电采用全功率变流器,实现了机组与电网的完全隔离,故障特性取决于网侧变流器故障控制策略。在故障期间投入直流 Chopper 卸荷电路;

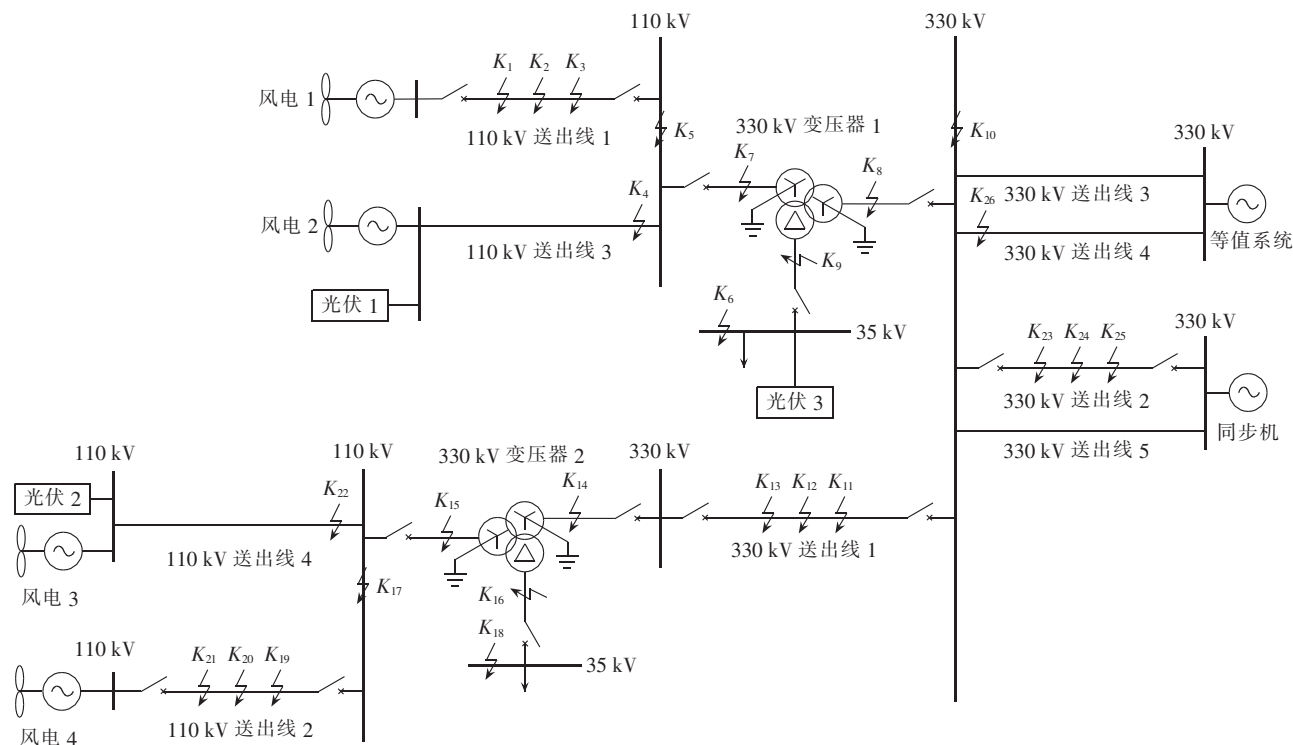


图 2 风电场送出电网保护 RTDS 试验系统

Fig.2 RTDS test system for relay protection of wind farm outgoing power grid

调整网侧变流器有功功率控制目标,同时发出无功功率支撑系统电压;采用正负序分离控制技术消除故障电流中的负序分量。直驱式风电详细模型参见文献[15]。

c. 光伏电站模型。

光伏电站也采用全功率变流器,其故障控制策略及暂态特征与直驱式风电类似,不再赘述。

d. 新能源场站暂态等值方案。

采用基于容量加权的参数聚合等值方案,为简化分析,近似认为同一风电场内所有机组运行在相同工况,详细等值方案参见文献[6-7]。

2.3 试验结果分析

试验共进行 166 组不同位置、类型故障,重点考察线路、变压器等元件区内及区外系统侧故障时,各保护元件受风电暂态电压、电流特征的影响。统计各保护装置试验结果,得出各保护元件的正确动作率如表 1 所示。

表 1 保护元件正确动作率统计
Tab.1 Statistics of correct operation rate for protection components

保护元件	正确动作率/%
分相电流差动元件	100.0
零序电流差动元件	100.0
纵联距离元件	66.2
纵联方向元件	78.9
110 kV 距离元件	57.8
330 kV 距离元件	70.4
零序电流元件	100.0
选相元件	76.1

a. 基于单端电流量的选相、零序电流元件。

风电场端的弱电源特性使得 110 kV 及以上电压送出系统接地短路时,正负序阻抗远大于零序阻抗,且零序网络中不包含风电机组部分。接地故障时风电场侧短路电流主要为零序分量,使得三相电流相近,且零序电压、电流中不会有非工频分量的存在^[9]。试验结果表明,利用电流变化特征的选相元件受到严重影响,零序电流保护可以正确动作。

b. 基于单端电压、电流量的距离、方向元件。

双馈式风电场送出线路故障时,风电场侧短路电流的主要频率分量随短路前机组工况变化,不再保持工频,而风电场侧母线电压一般由系统支撑,可以维持工频,使得风电场侧保护测量处的电压、电流频率有所差别,会对依据电压、电流运算结果而动作的距离元件、方向元件产生不良影响。试验结果表明,距离元件、相分量及正负序分相方向元件正确动作率极低,零序方向元件可以正常工作^[11]。

c. 基于双端电流量的差动元件。

基于双端电流量的分相电流差动、零序电流差动保护,在风电场暂态电流的作用下正确动作率均

为 100%,仅是灵敏度有所降低。

d. 基于双端电压、电流量的纵联距离、纵联方向元件。

基于双端电压、电流量的纵联距离、纵联方向保护,会受到风电场侧距离、方向元件不正确动作的影响。对于允许式及闭锁式纵联保护,都可能造成线路区内故障的拒动及区外系统侧故障的误动。

3 风电场送出电网保护配置建议

风电场送出电网保护影响 RTDS 试验表明,当前风电场送出电网继电保护配置无法很好地适应风电场大规模集中式接入的情况,需要对当前保护配置情况进行改进。

3.1 110 kV 送出线路保护配置

110 kV 风电场送出线路的主保护建议配置分相电流差动保护,其在风电场暂态电流的作用下仅是灵敏度有所降低,对于动作的正确性并无明显影响。

保护中的基于相量算法的阶段式相间和接地距离保护无法适应大规模风电接入的现状。双馈风机故障暂态电流衰减时间常数 $\tau'_i=0.026\text{ s}^{[11]}$,即经过 $4\tau'_i\sim 5\tau'_i$ 后,风机不再向电网送出非工频电流。因此对于无延迟动作的距离Ⅰ段,将因为故障电流严重的非工频分量而导致保护不正确动作;对于带延时动作的距离Ⅱ段和Ⅲ段,由于故障电压、电流中的非工频分量几乎衰减完毕,所以仍可以正常工作。因此建议在实际运行中退出距离Ⅰ段,或者增加一个 0.15 s 的延时。而解微分方程算法的距离元件是基于线路 RL 时域模型而设计,与信号的频率没有直接的联系,可避免相量距离保护算法存在的问题,建议采用以保证Ⅰ段的正常快速动作^[11],距离Ⅱ、Ⅲ段正常配置。

根据试验分析,基于零序分量的零序电流保护可以正常工作而不受风电接入的影响,建议配置作为高阻接地故障的后备保护。

3.2 送出变压器保护配置

变压器主保护所采用的比率制动特性的电流差动保护同样在风电场暂态电流的作用下灵敏度降低。另外,采用 2 次谐波制动的励磁涌流闭锁判据在非工频电流分量的作用下会在较长的时间内(严重情况下达到 2~3 个周期)将电流差动保护闭锁^[8],从而使得差动保护的動作速度减慢。因此为了保证变压器差动保护的快速动作,应当考虑采用其他的不受非工频分量影响的励磁涌流判据,如间断角鉴别、时差法等。

后备保护配置过电流保护、复合电压启动的过电流保护或复合电流保护。变压器保护中的零序电流方向保护不受风电接入的影响,因此可投入作为

区内接地故障的后备保护。

3.3 330 kV 送出线路保护元件

试验结果表明,纵联距离、纵联方向保护受风电的暂态电压、电流影响无法正常工作,而纵联电流差动保护仅是灵敏度降低,仍可快速正确动作。因此建议配置 2 套独立的光纤电流差动保护作为 330 kV 线路的主保护,以提高保护的正确动作率。

由于风电场的弱电源特性,风电场侧保护装置基于电流量的选相元件正确动作率较低,建议采用基于电压突变量的选相元件以保证弱电源侧的选相灵敏度。

受风电的暂态电压、电流影响,基于正、负序及相量分量的方向元件正确动作率较低,建议采用基于零序分量的方向元件^[9]。

后备保护配置建议与 110 kV 送出线路相同。

4 结论

本文根据大规模风电场并网送出电网继电保护影响 RTDS 试验结果,分析了当前保护存在的问题,并给出风电场送出电网保护配置建议如下:

a. 110 kV 线路的主保护采用分相电流差动保护,建议采用解微分方程算法的距离 I 段,或将相量距离 I 段保护延时 0.15 s 动作,同时配备常规距离 II、III 段及零序电流保护以作为相间及接地故障的后备保护;

b. 送出变压器的主保护采用比率差动保护,建议采用不受非工频分量影响的间断角鉴别、时差法等励磁涌流判据,后备保护配置过电流保护及零序电流方向保护;

c. 330 kV 送出线路主保护建议配置 2 套相互独立的分相电流差动保护,采用电压突变量选相元件及基于零序分量的方向元件,后备保护配置建议与 110 kV 送出线路相同。

参考文献:

- [1] 焦在强. 大规模风电接入的继电保护问题综述[J]. 电网技术, 2012,36(7):195-201.
JIAO Zaiqiang. A survey on relay protection for grid-connection of large-scale wind farm[J]. Power System Technology, 2012,36(7):195-201.
- [2] 何世恩,姚旭,徐善飞. 大规模风电接入对继电保护的影响与对策[J]. 电力系统保护与控制, 2013,41(1):21-27.
HE Shien,YAO Xu,XU Shanfei. Impacts of large-scale wind power integration on relay protection and countermeasures [J]. Power System Protection and Control, 2013,41(1):21-27.
- [3] 李生虎,贾树森,孙莎莎. 风电系统距离 III 段保护动作特性分析[J]. 电力系统自动化, 2011,35(5):31-35.
LI Shenghu,JIA Shusen,SUN Shasha. Operation characteristics analysis of zone 3 distance protection in wind power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011,35(5):31-35.

- [4] 苏常胜,李凤婷,武宇平. 双馈风电机组短路特性及对保护整定的影响[J]. 电力系统自动化, 2011,35(6):86-91.
SU Changsheng,LI Fengting,WU Yuping. An analysis on short-circuit characteristic of wind turbine driven doubly fed induction generator and its impact on relay setting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011,35(6):86-91.
- [5] PRADHAN A K,JOOS G. Adaptive distance relay setting for lines connecting wind farms[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007,22(1):206-213.
- [6] 张保会,李光辉,王进,等. 风电接入对继电保护的影响(一)——鼠笼式风电场电磁暂态等值建模[J]. 电力自动化设备, 2013,33(1):1-6.
ZHANG Baohui,LI Guanghui,WANG Jin,et al. Impact of wind farm integration on relay protection(1):electromagnetic transient equivalent model of FSIG-based wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013,33(1):1-6.
- [7] 张保会,李光辉,王进,等. 风电接入对继电保护的影响(二)——双馈式风电场电磁暂态等值建模[J]. 电力自动化设备, 2013,33(2):1-8.
ZHANG Baohui,LI Guanghui,WANG Jin,et al. Impact of wind farm integration on relay protection(2):DFIG-based wind farm electromagnetic transient equivalent model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013,33(2):1-8.
- [8] 张保会,王进,郝治国,等. 风电接入对继电保护的影响(三)——风电场送出变压器保护性能分析[J]. 电力自动化设备, 2013,33(3):1-8.
ZHANG Baohui,WANG Jin,HAO Zhiguo,et al. Impact of wind farm integration on relay protection(3):performance analysis for wind farm outgoing transformer protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013,33(3):1-8.
- [9] 张保会,王进,原博,等. 风电接入对继电保护的影响(四)——风电场送出线路保护性能分析[J]. 电力自动化设备, 2013,33(4):1-6.
ZHANG Baohui,WANG Jin,YUAN Bo,et al. Impact of wind farm integration on relay protection(4):performance analysis for wind farm outgoing transmission line protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013,33(4):1-6.
- [10] 张保会,郭丹阳,王进,等. 风电接入对继电保护的影响(五)——风电分散式接入配电网对电流保护影响分析[J]. 电力自动化设备, 2013,33(5):1-6.
ZHANG Baohui,GUO Danyang,WANG Jin,et al. Impact of wind farm integration on relay protection(5):impact of wind farms dispersedly connected to distribution network on current protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013,33(5):1-6.
- [11] 张保会,张金华,原博,等. 风电接入对继电保护的影响(六)——风电送出线路距离保护影响分析[J]. 电力自动化设备, 2013,33(6):1-6.
ZHANG Baohui,ZHANG Jinhua,YUAN Bo,et al. Impact of wind farm integration on relay protection(6):analysis of distance protection for wind farm outgoing transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013,33(6):1-6.
- [12] 朱永强,张旭. 风电场电气系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2010:124-126.
- [13] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社, 2010:166-195.
- [14] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京:中国电力出版社, 1994:170-186.

- [15] 张保会,李光辉,王进,等. 风电接入电力系统故障电流的影响因素分析及对继电保护的影响[J]. 电力自动化设备,2012,32(2):1-8.
ZHANG Baohui,LI Guanghui,WANG Jin,et al. Affecting factors of grid connected wind power on fault current and impact on protection relay[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(2):1-8.
- [16] SAMAAN N,ZAVADIL R,SMITH J C,et al. Modeling of wind power plants for short circuit analysis in the transmission network[C]//IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Chicago,IL,USA:IEEE,2008:1-7.
- [17] 何世恩,索南加乐,杨钺,等. 适应于酒泉风电送出的750 kV线路纵联保护原理研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(16):87-91.
HE Shien,SUONAN Jiale,YANG Cheng,et al. A 750 kV transmission line pilot protection suitable to Jiuquan wind power base delivery[J]. Power System Protection and Control,2010,38(16):87-91.
- [18] 文玉玲,晁勤,吐尔逊·伊布拉音. 关于风电场适应性继电保护的探讨[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(5):47-51.
WEN Yuling,CHAO Qin,TUERXUN Yibulayin. Study on adaptive protection of wind farm[J]. Power System Protection and Control,2009,37(5):47-51.
- [19] 朱晓东,石磊,陈宁,等. 考虑Crowbar阻值和退出时间的双馈风电机组低电压穿越[J]. 电力系统自动化,2010,34(18):84-89.
ZHU Xiaodong,SHI Lei,CHEN Ning,et al. Analysis on low voltage ride through of wind turbine driven doubly fed induction generator with different resistances and quitting time of Crowbar[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(18):84-89.
- [20] KAWADY T A. An interactive simulation of grid-connected DFIG units for protective relaying studies [C]//Proceeding of 1st IEEE-PES/IAS Conference on Sustainable Alternative Energy, SAE. Valencia,Spain:IEEE,2009:1-8.

作者简介:

张保会(1953-),男,河北魏县人,教授,博士研究生导师,从事电力系统继电保护、安全自动装置、电力系统通信等方面的研究(E-mail:bhzhang@mail.xjtu.edu.cn);

原博(1990-),男,山西运城人,硕士研究生,主要从事风电接入继电保护相关研究(E-mail:yuanbo.1990@gmail.com);

王进(1988-),男,山东聊城人,硕士研究生,主要从事风电接入继电保护相关研究(E-mail:windmill.xjtu@gmail.com)。

Impact of wind farm integration on relay protection(7): analysis of relay protection configuration for wind farm outgoing power grid

ZHANG Baohui¹,YUAN Bo¹,WANG Jin¹,WANG Xiaoli^{1,2},

HUANG Renmou³,WU Weiming³

(1. School of Electrical Engineering,Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China;

2. Dispatching Center of Ningxia Electric Power Company,Yinchuan 750001,China;

3. Hainan Power Grid Corporation,Haikou 570100,China)

Abstract: The RTDS experiment is carried out for the relay protections of outgoing power grid of large-scale grid-connected wind farm and its existing problems are pointed out. The corresponding suggestions about the relay configuration are proposed:the main protection of 110 kV outgoing transmission line should adopt the phase-split current differential protection while its backup protection adopt the distance section I using differential equation algorithm,or the time setting of phasor-based distance section I be prolonged by 0.15 s while the conventional distance section II,distance section III and zero-sequence current protection be equipped;the main protection of outgoing transformer should adopt the differential protection with the inrush current criterion using the dead angle identification,time-difference method,etc. while its backup protection adopt the compound over-current protection and zero-sequence current direction protection;the main protection of 330 kV outgoing transmission line should adopt two independent sets of phase-split current differential protection with the voltage sudden-change phase selector and zero-sequence directional component while its backup protection adopt the same configuration as that of 110 kV outgoing transmission line.

Key words: wind farms; relay protection; protection configuration; RTDS test; models