

含分布式电源的配电网馈线系统保护研究

陈冲¹, 陈小伟², 沈明慷¹, 申丹¹

(1.江苏省电力公司检修分公司苏州分部, 江苏苏州 215000;

2.三峡大学电气与新能源学院, 湖北宜昌 443002)

摘要:智能配电网(SDG)的发展,将允许分布式电源(DG)大量接入。DG的引入改变了配电网馈线系统保护中馈线终端单元(FTU)感受到的故障电流大小及方向,因此SDG要求系统保护的故障处理应更加快速并且能够准确判别不同方向的故障潮流。提出了基于瞬时功率的保护启动元件以及故障方向判据,基于瞬时功率的故障特征量计算依据电压、电流的瞬时值,运算量小、速度快、实时性好。PSCAD/EMTDC仿真结果验证了该类快速算法的可行性和可靠性。

关键词:智能配电网;分布式电源;系统保护;馈线终端;瞬时功率

中图分类号:TM63

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2012)06-0006-05

智能配电网(SDG)是智能电网的重要组成部分,允许大量的分布式电源(DG)接入也是智能配电网区别于传统的配电网的一个重要特征^[1]。配电网接入DG以后,不再是纯粹的单电源、辐射型供电网络。当线路发生故障时,配电网中的短路电流大小和方向以及重合器的动作行为都会受到DG的影响。如何在故障发生时快速地切除DG,并准确地定位,隔离故障点将是SDG发展的内在要求。

配电网馈线系统保护是建立在配电自动化和具备良好通信功能的FTU的基础之上。它通过在多于2个的FTU之间相互交换故障信息,并在FTU中完成对故障信息的计算,并且向相邻开关发出跳合闸命令,现实故障点的就地隔离和故障恢复。系统保护将故障处理功能下放到FTU,能够实现故障的一次性就地处理,速度快可靠性高。系统保护在配电网馈线层故障处理的优越特性将成为未来智能配电网保护的主保护^[2]。目前的微机保护装置中常用基于电流相位比较的方法判别故障方向,该方法无法满足系统保护作为主保护的快速性要求。因此,本文提出了基于瞬时功率的保护启动元件以及故障方向判据的系统保护算法。

1 含DG的馈线系统保护原理

1.1 DG对系统保护的影响

基于系统保护模式的含DG的馈线自动化系统如图1所示。在线路的c区段引入了一个DG。DG的引入使馈线1的各区段不再是单电源网络。DG对配电网系统保护的影响:例如当b区段发生故障时,在DG接入前,线路故障电流只有从系统电源流向故障点的一个方向,B13不经历故障电流;而接入DG后B12,B13都将流过故障电流,系

统保护将无法实现故障定位和隔离。而在故障恢复时,由于DG的存在,联络开关H12左端因有压将继续保持在分闸闭锁状态,故无法恢复非故障区段的供电。

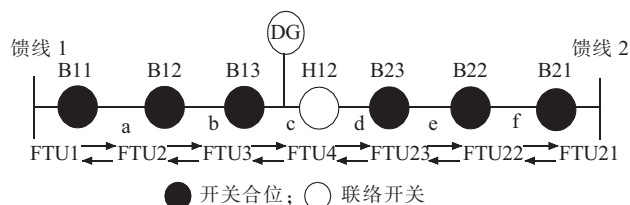


图1 DG对配电网系统保护的影响

1.2 原理分析

由上述分析可知,含DG的配电网系统保护必须考虑故障方向的快速判别和DG的快速切除。以图1典型系统为例,当b区段发生故障时,其故障处理流程为:

(1) 当FTU检测到故障电流,保护启动元件启动FTU11,FTU12和FTU13同时计算故障状态量;DG自身保护检测到故障电流,经设定延时切除DG使其脱离系统。

(2) 经计算开关B11,B12,B13都经历故障电流,以短路电流从母线流向负荷为故障正方向,则B11,B12为功率正方向,B13为反方向。

(3) B11,B12生成故障标志“1”,B13故障标志“0”,3个开关对应的FTU相互通信交换故障标志。

(4) FTU11检测到FTU12故障标志为“1”,则不跳闸出口;FTU12检测到右侧相邻FTU13的故障标志为“0”,则跳闸出口;FTU13右侧为联络开关H12直接跳闸出口。

(5) B12在跳开后立即重合一次,若重合成功则表明瞬时故障,在将信息传递给FTU13,B13重合;重合不成,则B12再次跳闸并闭锁,并向FTU13发闭锁命令,至此故障隔离。

(6) FTU4 在定值时间内监测到左侧失压,在判断负荷情况后合闸,非故障区段供电恢复, DG 恢复供电。

系统保护对于故障处理过程可概括为保护启动、故障判别、相互通信、协同动作。系统保护主要通过 FTU 实现故障检测、快速故障隔离,进行简单的供电恢复操作,复杂的负荷转移由配网主站、子站来配合实现。

2 基于瞬时功率的系统保护算法

2.1 瞬时功率计算

传统馈线过流保护设置在变电站出口断路器处,一般整定为 200 ms。作为主保护的系统保护必须在 200 ms 内完成故障处理。因此,系统保护的快速性应具有快速的通信机制、高性能的保护装置(可以嵌入在 FTU 功能中),在保护启动算法以及故障方向判别算法的快速性要求将更高。SDG 的发展,未来的配电网将配置有各种智能开关和传感器。馈线三相电压、电流的全面采集,为基于 Clarke 变换的瞬时功率的故障特征量计算创造了条件。瞬时功率都是直接利用电压、电流的瞬时采样值计算,对滤波器要求不高,算法本身也不涉及复杂的复数计算,是一种快速特征检测算法^[3]。

Clarke 变换是当 $\theta=wt=0$ 的 Park 变换,其思想是将三相静止的 abc 坐标系变换到两相静止的 $\alpha\beta$ 坐标系。Clarke 变换式为:

$$f_{\alpha\beta} = C f_{abc} \quad (1)$$

式(1)中: C 是 Clarke 变换矩阵。在恒功率变换准则下和三相三线制系统中,零轴分量为 0,可以忽略不计,Clarke 变换矩阵用 C_{32} 表示:

$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

设三相电路的瞬时电压和瞬时电流分别为 u_a, u_b, u_c 和 i_a, i_b, i_c 。经过 Clarke 变换后,得到两相瞬时电压 u_α, u_β 和电流 i_α, i_β :

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

α 轴、 β 轴相互垂直,瞬时功率的定义为:

$$\begin{cases} p = u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta \\ q = u_\beta i_\alpha - u_\alpha i_\beta \end{cases} \quad (5)$$

基于 Clarke 变换的瞬时功率计算,都是对电压、电流的瞬时采样值进行计算,变换的过程也不涉及复数运算,运算量小,速度快,实时性强。其中式(5)分别是瞬时有功功率和瞬时无功功率的定义。本文分析和仿真结果是基于瞬时功率的保护启动元件以及基于瞬时功率极性的故障方向判据利用的是瞬时功率的有功分量。

2.2 基于瞬时功率的保护启动元件

启动元件通过启动算法实现,对算法要求有足够的故障灵敏度和响应速度,要求做到正常负荷下不能启动。常见的启动量有相电流、差动电流和序电流等。在故障发生时,无论是正方向故障还是反方向故障瞬时功率在数值上都有一个正、负的急剧变化,基于瞬时功率变化考虑用瞬时功率的突变量作为故障启动元件。设每个工频周期采样点数为 N_s , 瞬时功率突变量的计算为:

$$|\Delta p(K)| = \left| |p(K) - p(K-N_s)| - |p(K-N_s) - p(K-2N_s)| \right| \quad (6)$$

正常运行状态下,式(6)的理论值接近于 0,考虑到负荷波动情况以及各种误差因素,为避免误启动,必须设定一门槛值,其整定要求考虑到负荷波动引起的最大不平衡输出,因此基于瞬时有功突变量的判据为:

$$\Delta p(K) > k_f \Delta p_{s.set} \quad (7)$$

k_f 为可靠系数,为防止干扰,设定只有连续检测到 4 个采样点的瞬时功率超过定值,元件方能启动,提高保护的可靠性。瞬时有功的突变量启动需要连续计算并连续识别是否发生突变。

2.3 基于瞬时功率极性的故障方向判断

基于瞬时有功功率的定义,给出当电压和电流均为正弦波形的瞬时功率的计算,结合式(5)可得:

$$p = 3U_1 I_1 (\cos(wt + \varphi_u) \cos(wt + \varphi_i) + \sin(wt + \varphi_u) \sin(wt + \varphi_i)) = 3U_1 I_1 \cos(\varphi_u - \varphi_i) \quad (8)$$

规定流过 FTU 的电流从母线指向线路,正方向发生短路故障时,短路电流滞后母线电压的相角为 φ_{k1} 大小为 $-90^\circ < \varphi_{k1} < 90^\circ$ 。反方向故障时,短路电流滞后母线电压的相角为 φ_{k2} , 大小为 $180^\circ < \varphi_{k2} < 270^\circ$ 。可以看出当正向故障时,瞬时功率 $p = 3U_1 I_1 \cos(\varphi_u - \varphi_i) > 0$; 反向故障时瞬时功率 $p = 3U_1 I_1 \cos(\varphi_u - \varphi_i) < 0$, 因此可以采用基于瞬时功率极性来判别故障方向。在 50 Hz 频率下,一个工频周期时间为 20 ms, 设一个工频周期内采样点数为 N_s 。故障分量在故障后的一个周波内最为明显,在这里故障判据采

用 1/4 周波内数据,即判断连续 1/4 点的平均瞬时功率的极性,该判据能在 5 ms 内给出了故障方向,判据为:

$$\begin{cases} p(k) = \frac{4}{N_s} \sum_0^{N_s/4-1} u_\alpha(k) i_\alpha(k) + u_\beta(k) i_\beta(k) & (k) > 0 \text{ 正方向故障} \\ p(k) = \frac{4}{N_s} \sum_0^{N_s/4-1} u_\alpha(k) i_\alpha(k) + u_\beta(k) i_\beta(k) & (k) < 0 \text{ 正方向故障} \end{cases} \quad (9)$$

3 仿真及分析

3.1 仿真模型

含 DG 的 10 kV 馈线系统保护仿真模型如图 2 所示。

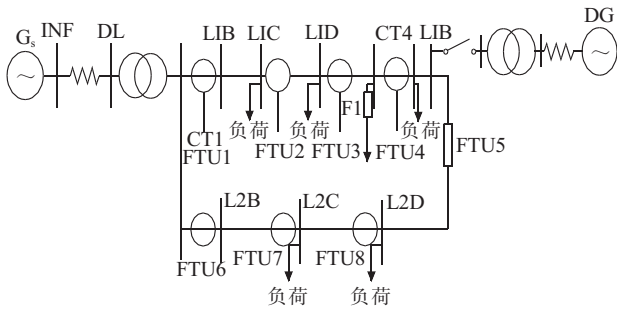


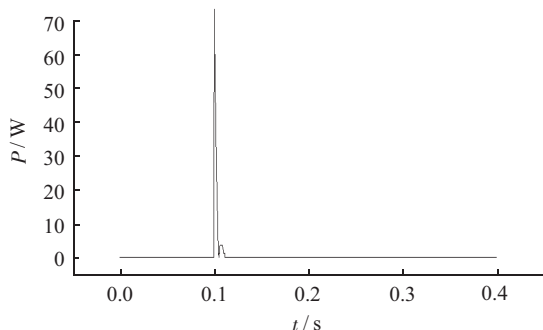
图 2 含 DG 的 10 kV 馈线系统保护仿真模型

线路分布参数设置如下:正序阻抗 $Z_1 = (0.17 + j0.38) \Omega/\text{km}$, 正序容纳 $Y_1 = 3.045 \mu\text{S}/\text{km}$; 零序阻抗 $Z_0 = (0.23 + j1.72) \Omega/\text{km}$, 零序容纳 $Y_0 = 1.045884 \mu\text{S}/\text{km}$; 系统阻抗 $Z = (15 + j170) \Omega$; 三相对称负荷 $L = (19.55 + j12) \Omega$, 系统电源侧用三相无穷大电源等效。DG 容量为 $10 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。每个工频周期采样 100 点,采样频率为 5 kHz,每个电流互感器(TA)处配置 FTU。

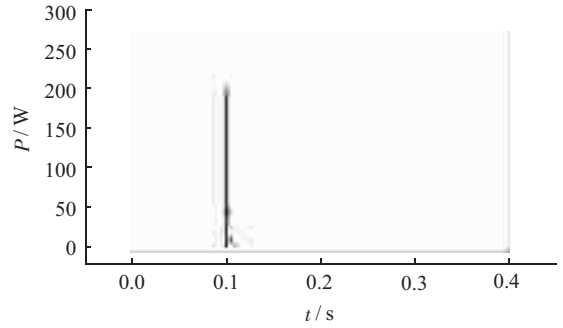
3.2 含 DG 时瞬时功率突变情况

仿真设置在 $t = 0.1 \text{ s}$ 时发生永久性短路故障,各 FTU 检测到故障瞬时功率在短路时刻应该有一个功率瞬时值的突变量。短路故障时 FTU 检测到的瞬时功率突变量如图 3 所示。

由图 3 可知,在正常时,曲线平缓,变化量接近于 0;故障时,都有一个较明显的激增。由于 DG 的



(a) FTU1 故障时瞬时功率突变情况



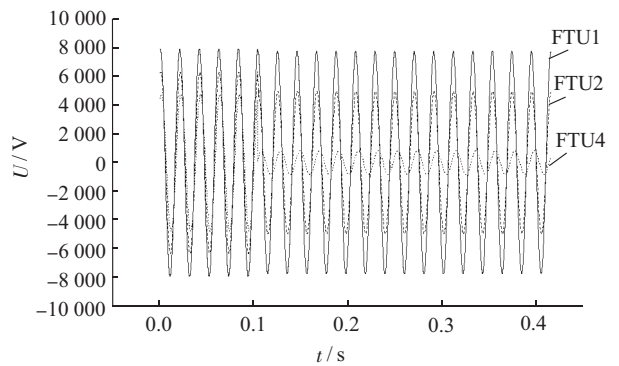
(b) FTU4 故障时瞬时功率突变情况

图 3 短路故障时 FTU 检测到的瞬时功率突变量

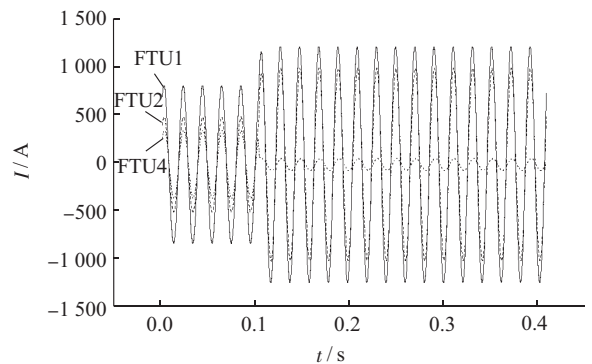
存在,FTU4 短路后功率方向的改变,因此,FTU4 检测到的突变量更加明显,瞬时功率作为突变量有足够可靠的裕度。

3.3 不含 DG 时瞬时功率分布

不含 DG 时系统是单电源供电网络,短路点 F1 处电流由系统电源注入。当发生三相短路故障时,FTU1,FTU3,FTU4 所测得的短路电压和电流波形如图 4 所示,在 $t = 0.1 \text{ s}$ 时,故障发生其电压下降,其中离系统电源越远的电压降越厉害,电流升高,离系统电源越近电流越大。由于故障点位于 FTU4 之前,因而流过 FTU4 的故障电压、电流很小,几乎为 0。



(a) 电压波形



(b) 电流波形

图 4 F1 处三相短路时电压和电流录波

各 FTU 检测的瞬时功率波形如图 5 所示。

从图 5 可知,由于 FTU1,FTU2 都位于故障正方向位置,在故障发生时,瞬时功率都大于 0,并且

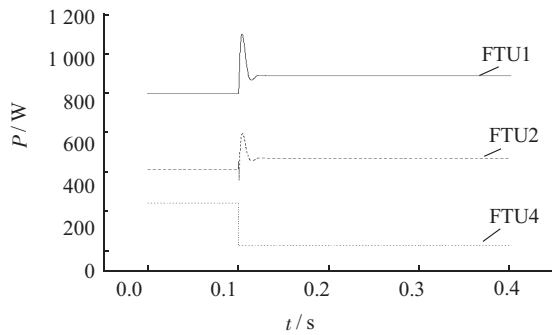
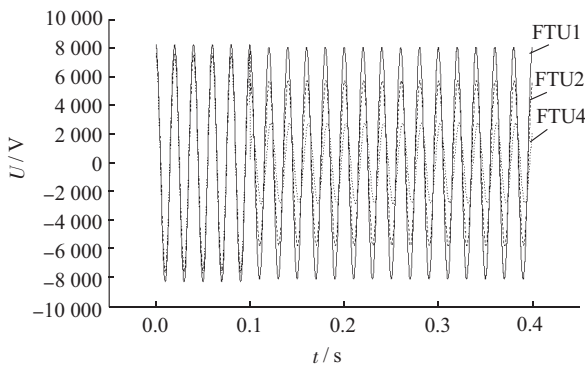


图5 各 FTU 检测的瞬时功率波形

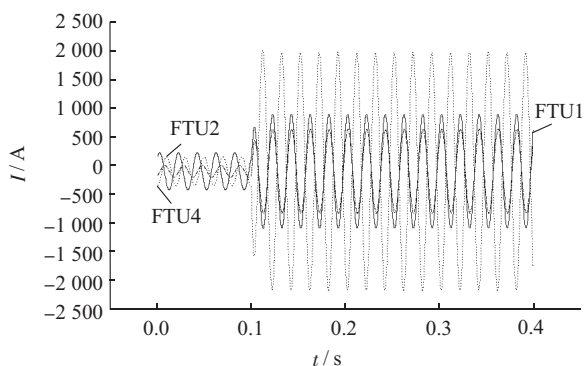
有一个正的突变量。而故障发生后由于 FTU4 未有注入电流,流过的瞬时功率为 0。

3.4 含 DG 时瞬时功率分布

在馈线 L1 段母线 E 接入一分布式电源后,系统将成为一个双电源供电网络,当故障发生时,短路点 F1 将有 DG 注入的短路电流,而 FTU4 也将检测到故障功率流过,此时区分各 FTU 流过的故障功率方向尤为重要。当 F1 处三相短路时,FTU1, FTU2, FTU4 所测得的短路电压和电流波形如图 6 所示。



(a) 电压波形



(b) 电流波形

图6 含 DG 系统三相短路时电压和电流录波

由图 6 可见,当含 DG 时,FTU4 处依然能检测到一个较大的电压,流经一个较大的故障电流,且该故障电流的相位与流经 FTU1, FTU2 处的相反。含 DG 系统三相短路时瞬时功率情况如图 7 所示。

由图 7 可看出,FTU1, FTU2 在规定故障正方向

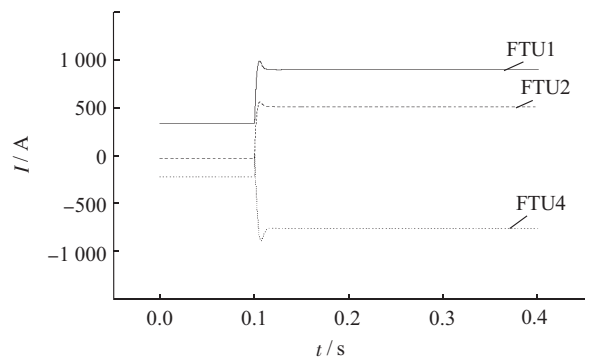


图7 含 DG 系统三相短路时瞬时功率情况

上,检测到的瞬时功率大于 0,在故障时刻有一个向正方向上的突变;FTU4 由于 DG 的存在,提供了一个反方向的故障电流,因此其检测到的在故障后其流经的故障功率为负,在故障时刻有一个负方向的突变。

4 结束语

DG 存在改变了配电网故障潮流的大小和方向。本文考虑在 SDG 中将大量的接入 DG,并且能够实现电气量的全面测量的特点,以及 SDG 要求故障处理应更加快速准确。认为配电网馈线系统保护通过对等通信机制,就地快速定位、隔离故障,将成为配电网中的馈线主保护。同时在含 DG 的系统保护算法上提出了基于瞬时功率的故障启动元件以及故障方向判据,基于 Clarke 变换的瞬时功率特征量计算依据电压、电流的瞬时值,运算量小、速度快、实时性好,能够快速启动保护并判别故障潮流方向。通过建立 10 kV 馈线环网的 ATP-EMTP 模型进行仿真试验,其可行性和可靠性得到了验证。

参考文献:

- [1] 徐丙垠,李天友,薛永端. 智能配电网与配电自动化[J]. 电力系统自动化,2009,33(17):38-41.
- [2] 焦振有,焦邵华,刘万顺. 配电网馈线系统保护原理及分析[J]. 电网技术,2002,26(12):75-78.
- [3] 刘进军,王兆安. 瞬时无功功率与传统功率理论的统一数学描述及物理意义[J]. 电工技术学报,1998,13(6):6-11.

作者简介:

陈冲(1985),男,江苏苏州人,硕士研究生,从事输配电系统自动化技术工作;

陈小伟(1984),男,湖北宜昌人,三峡大学电气与新能源学院硕士研究生在读;

沈明慷(1975),男,江苏苏州人,工程师,从事电力系统运行及管理工作;

申丹(1981),男,江苏苏州人,工程师,从事变电运行工作。

Research on Distribution Feeder System of with Distributed Power

CHEN Chong¹, CHEN Xiao-wei², SHEN Ming-kang¹, SHEN Dan¹

(1. Suzhou Department of Jiangsu Electric Power Company's Maintenance Branch Suzhou 215000, China

2. Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: With the development of smart distribution grids (SDG), more and more distributed power (DG) will be allowed to SDG. The importing of DG changes the size and direction of fault current which is perceived by feeder terminal unit (FTU) in distribution feeder system protection, therefore, SDG requires that system protection fault should be handled more quickly and accurately distinguish different fault flow direction. Protection starting components and fault direction criterion based on the instantaneous power is proposed in this paper. Calculation of fault feature according on the instantaneous value of the voltage and current has features of small amount of computation, quick speed and good real-time. PSCAD / EMTDC simulation results verify the feasibility and reliability of such a fast algorithm.

Key words: smart distribution grids; distributed power; system protection; feeder terminal; instantaneous power

(上接第 5 页)

任先成(1980),男,山西繁峙人,博士,从事电力系统分析与规划方面的工作;

薛峰(1971),男,江苏无锡人,研究员级高级工程师,从事电

力系统分析、规划与控制方面的工作;

方俊杰(1964),男,河北蔚县人,研究员级高级工程师,从事电力系统分析、规划与控制方面的工作。

Review of the Research on Transmission Network Planning with Large Scale Wind Power Connected

CUI Xiao-dan^{1,2}, LI Wei^{1,2}, REN Xian-cheng^{1,2}, XUE Feng², FANG Yong-jie²

(1.State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;

2.China Electric Power Research Institute; Nanjing 210003, China)

Abstract: Firstly, the effect of large scale wind power connection on transmission planning was discussed. Then various research works in transmission planning filed considering large scale wind power connected were reviewed from many respects, such as evaluation index, assessment system, modeling of large scale wind power, uncertainty of wind power, policy management and market factors. Lastly, some issues focused on were discussed for transmission planning and some suggestions were offered for the research in the future

Key words: large scale wind power; transmission planning; assessment; uncertainty; review

下 期 要 目

- 电网广域监测系统的数据库集成方案
- 日前发电计划安全校核系统开发与应用
- 基于模块化多电平换流器结构的柔性直流系统控制策略研究
- SVC 电压稳定控制和抑制低频振荡交互影响研究
- 基于改进牛顿法的 VSC-HVDC 潮流计算
- 电动汽车无线充电技术
- 银东直流西北侧电网稳定控制系统实现
- 一起 110 kV 主变差动保护动作原因分析
- 扩大外桥式接线改建工程相关问题分析
- 某 660 MW 汽轮发电机组漏氢量超标原因分析及处理
- 电厂电动执行机构软启动器设计