

# 基于支路暂态势能和两端电压识别 临界机群的新方法

蔡国伟<sup>1</sup>, 穆 钢<sup>2</sup>, 程浩忠<sup>1</sup>, K W Chan<sup>3</sup>

(1.上海交通大学 电力学院, 上海 203000; 2.东北电力学院 电力工程系, 吉林市 132012;  
3.香港理工大学 电机工程系, 香港特别行政区 九龙)

**摘 要:** 简便而准确地识别大扰动下的电力系统分群模式是电力系统动态安全分析方法如 TEF、EEAC、Hybrid TEF 和 Hybrid EEAC 等诸多动态安全评价方法中非常重要的问题之一。提出一种识别电力系统临界机群和非临界机群的新方法, 该方法基于支路的暂态势能及支路两端的电压变化情况构建量化的指标以识别故障后网络中临界割集, 进而实现对临界机组分群的快速判别。该方法仅依赖于支路的运行变量, 而无需发电机的任何动态信息, 不仅数据需求小, 而且算法简单易于实现。该方法的有效性在 New England 10 机 39 节点系统中得到满意的验证。

**关键词:** 动态安全评价; 临界机群; 临界割集; 支路势能

中图分类号: TM712

文献标识码: A

文章编号: 1004-9649(2002)05-0040-05

## 0 引言

由于电力市场的日益开放及环境等因素的影响, 使电力系统的运行越来越接近于系统的稳定极限, 因此系统在线的动态安全评价(DSA)在电力系统的能量管理系统(EMS)及市场化运营中日益受到重视<sup>[1]</sup>。动态安全评价方法很多, 如时域仿真法<sup>[2]</sup>及基于暂态能量函数<sup>[3,4]</sup>和扩展等面积定则<sup>[5]</sup>的直接法等多种暂稳分析方法。其中, 时域仿真法以其精度、可靠性及模型的适应能力等方面的优点使其成为电力系统稳定性分析的主要工具, 但此方法在计算速度及不能量化稳定性的缺点使得在 90 年代发展起来的混合法<sup>[6]</sup>逐渐成为动态安全评价的良好工具<sup>[7,8]</sup>。

无论是直接法还是混合法, 准确地识别临界机群和剩余机群是使方法是否准确及能否实用化的重要因素之一。目前较常用的分群方法是根据快速仿真给出的发电机振荡曲线的周期和摇摆方向进行识别, 但对于大规模实际电力系统, 这种爆炸性的组合数目将导致在线计算十分困难。另外一种方法是在备选的分群组合中选择最小的临界切除时间或临界能量的分群方式, 该方法也同样存在计算数目过多的问题<sup>[9]</sup>, 文献[10]则根据系统稳定及不稳定轨迹将组合数目降低为  $n-1$ 。不同于其他方法, 本文的主

要思路是通过对故障后系统网络的临界割集的识别, 以实现临界机群和剩余机群的划分。基于结构保持的多机系统模型, 提出支路暂态能量的概念, 通过分析支路暂态能量并结合电压的变化特点, 构建了可快速识别临界割集的量化指标, 并可根据指标的符号, 简便地判断出临界机群及剩余机群。

## 1 系统模型

对于一个  $m$  台发电机、 $n^0$  个母线、 $l^0$  条输电线路的电力系统, 如果在网络中计及发电机内节点, 网络可增广成  $n^0+m=n$  个节点和  $l^0+m=l$  支路的增广网络。

若  $i$  节点的电压相角记为  $\delta_i$ , 则节点的频率偏差可能表示为  $\omega_i = \dot{\delta}_i$ 。如果以节点  $n$  为参考, 相角可记为  $\alpha_i (\alpha_i = \delta_i - \delta_n)$ , 支路相角差可表示为  $\sigma_k = \delta_i - \delta_j$ 。在忽略阻尼的情况下, 多机系统的结构保持模型可以描述为<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{\alpha}_g = T_g \omega_g \\ \dot{\omega}_g = -M_g^{-1} T_g^T [F(\alpha) - P^S] \end{cases} \quad (1)$$

其中  $M_g$  为发电机惯性时间常数矩阵,  $\alpha_g$  为发电机节点相对角度列相量,  $\omega_g$  为发电机角速度列相量,  $T_g$  为关联矩阵,  $P^S$  为相对于故障后稳定平衡状态的支路

收稿日期: 2001-11-26; 修回日期: 2002-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59977001)

作者简介: 蔡国伟(1968-), 男, 吉林市人, 工学博士, 从事电力系统稳定与控制研究。

有功潮流列相量。

假设  $(\alpha^s, 0)$  为系统的稳定平衡点, 由式 (1) 可导出保留网络拓扑关系的李亚普诺夫函数:

$$V(\alpha, \omega_g) = \frac{1}{2} \omega_g^T M_g \omega_g + W(\alpha, \alpha^s) = V_{KE}(\omega_g) + V_{PE}(\alpha, \alpha^s) \quad (2)$$

其中, 势能可表示如下:

$$V_{PE}(\alpha, \alpha^s) = \int_{\sigma_k^s}^{\sigma_k} [P_k(u) - P_k^s] du = \sum_{k=1}^l \int_{\sigma_k^s}^{\sigma_k} [P_k(u) - P_k^s] du \quad (3)$$

其中  $\sigma_k$  表示为第  $k$  条支路相角差,  $\sigma_k^s$  为第  $k$  条支路在故障后平衡状态下的相角差,  $P_k(\sigma_k)$  为第  $k$  条支路有功潮流,  $P_k(\sigma_k^s)$  为第  $k$  条支路在故障后平衡状态下的有功潮流。

若沿轨迹对式 (2) 的李亚普诺夫函数进行微分, 则有:

$$\dot{V}(\alpha, \omega_g) = 0 \quad (4)$$

由式 (3) \ (4) 表明沿故障后轨迹系统的总的暂态能量 (势能和动能的总和) 保持守恒。其中动能可表示为所有发电机动能之和, 势能则可表示为增广网络中所有支路的势能之和。

对于网络中的任意支路  $k$ , 该支路的势能可表示为:

$$V_{PEk}(\sigma_k) = \int_{\sigma_k^s}^{\sigma_k} [P_k(u) - P_k^s] du \quad (5)$$

如果将支路  $k$  在故障切除时刻的相角差记为  $\sigma_k^c$ , 则  $V_{PEk}(\sigma_k^c)$  表示为故障切除时刻该支路的势能, 式 (5) 可表示为式 (6):

$$V_{PEk}(\sigma_k) = \int_{\sigma_k^s}^{\sigma_k} [P_k(u) - P_k^s] du + V_{PEk}(\sigma_k^c, \sigma_k^s) \quad (6)$$

其中  $V_{PEk}(\sigma_k^c, \sigma_k^s)$  为支路  $k$  在故障切除时刻 ( $\sigma_k^c$ ) 与故障后稳定状态下 ( $\sigma_k^s$ ) 的势能增量。

由于势能的计算依赖于路径的积分, 因此路径上不同位置的势能增量与势能的参考点的值无关。故障后支路势能的变化可视为以故障切除时刻支路势能为参考, 则支路  $k$  沿故障后轨迹的势能可用式 (7) 表示为:

$$V_{PEk}(\sigma_k) = \int_{\sigma_k^s}^{\sigma_k} [P_k(u) - P_k^s] du \quad (7)$$

## 2 暂态能量在网络中的分布特性

在指定的扰动下多机电力系统中的发电机组可分为临界和非临界 2 个机群。对于临界机群可将其等值为一台发电机, 而对于非临界机群同样可将其等值为一个无穷大母线来模拟, 因此可用单机一无

穷大系统来近似研究多机系统中的暂态能量在网络中的分布特性。单机无穷大系统的连线示于图 1。

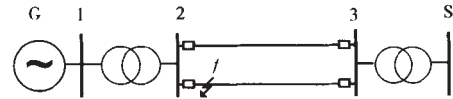
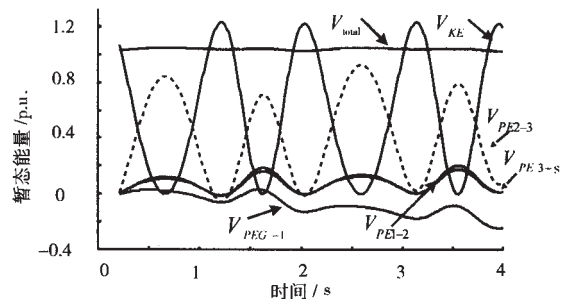


图 1 单机无穷大系统模型

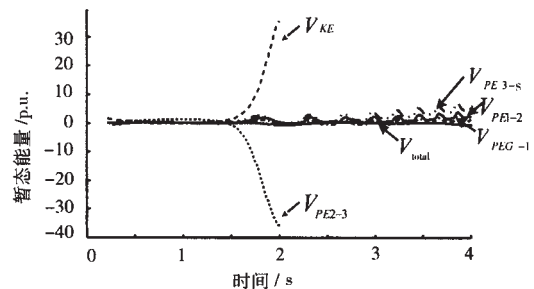
图 2 为单机系统中母线 2、3 间的一回线路中发生三相故障, 故障线路切除, 系统中发电机的动能和势能在各支路中的分布情况, 其中图 2a、b 分别对应于系统稳定和不稳定的情况。

通过图 2 中描述的系统暂态能量在网络中的分布情况, 可很容易地看出无论系统稳定与否, 沿着系统故障后的轨迹, 系统的总能量是守恒, 即系统的动能会逐步转化为系统的势能, 而势能将分布于包括发电机内电抗支路系统的所有支路中。

对于系统稳定的算例, 当故障线路被切除后, 发电机的机械转矩小于电磁转矩导致发电机减速, 动



a 稳定算例



b 不稳定算例

图 2 动能和势能的变化曲线

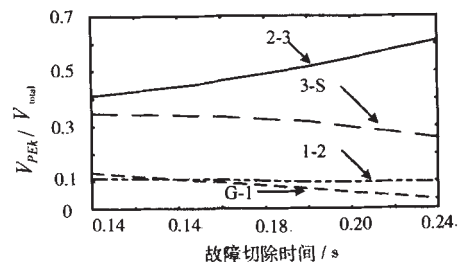


图 3 支路分担的暂态势能与故障时注入的动能的比值随故障切除时间的变化

能减小,势能等量增加,并分布于系统增广网络中的每个支路中,图2a中所示,支路2-3所分担的暂态势能高于其它支路,图3中给出各支路的暂态能量的分担的比例(各支路的暂态势能从最小值到最大值的增量相对于系统故障后注入到系统中总能量的比值)随故障切除时间的变化关系。从中表明随着系统稳定性的恶化,系统中某些局部环节(临界割集)上受到更严重的暂态能量的冲击,最终导致系统失去稳定性。

### 3 两机系统的振荡分析

发电机与无穷大系统的相量关系如图4所示。

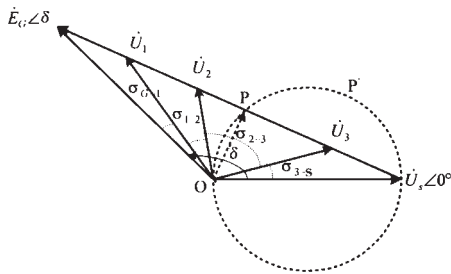


图4 单机系统的电压相量图

$E_C$  以及  $U_s$  分别代表发电机内电势和无穷大系统的电压相量,则相量  $U_1$ ,  $U_2$  和  $U_3$  表示节点1、2、3的电压相量,线段OP为三角形  $OU_sE_C$  的垂线。点P为系统的电压最低点,也即为系统的振荡中心<sup>[2]</sup>,即振荡中心两侧的系统围绕着该中心随着  $\delta$  的变化而进行摇摆。如果假设  $E_C$  和  $U_s$  幅值相等,在振荡过程中,振荡中心则落在  $E_C$  和  $U_s$  之间的电抗中心(忽略元件的电阻),当发电机与无穷大母线之间的摇摆角度到达  $180^\circ$ ,系统失去稳定时,该点的电压降为  $0^{[3]}$ 。应用振荡中心的上述概念,临界割集的识别可以通过振荡过程中电压最低点的所在位置进行考虑<sup>[4]</sup>。图1支路2-3中的某一点即为系统中的振荡中心,该中心将全系统分裂为相互摇摆的2个子系统。

### 4 临界机群识别指标

如上描述,故障后的系统的动能主要集中于网络中的局部环节,即临界割集上,对于多机电力系统,割集则是由支路组成,组成临界割集的支路在这里称为临界支路。若记  $t_{ck}$ 、 $t_{bk}$  为故障后支路  $k$  的暂态势能第1次达到其最小值和最大值的时刻。

由图4可见,如果连接支路  $k$  的2个节点分别为  $i$  和  $j$ ,显然  $k$  支路两端相角差在  $t_{bk}$  达到其最大值,而此时2节点的电压达到其最小值。

基于上述的综合考虑,连接节点  $i$  和  $j$  的支路  $k$

的识别指标定义如下:

$$LII_k = \left[ \text{sign} \left\{ \frac{d(a_i(t) - a_j(t))}{dt} \right\} \frac{\Delta V_{PEk}(t_{bk}, t_{ck})}{U_i(t_{bk}) U_j(t_{ck})} \right] \quad (11)$$

其中  $a_i$ 、 $a_j$  分别为节点  $i$  和  $j$  电压相角,  $U_i(t_{bk})$ 、 $U_j(t_{ck})$  分别为节点  $i$  和  $j$  在  $t_{bk}$  电压幅值,  $\Delta V_{PEk}(t_{ck}, t_{bk})$  为支路  $k$  在  $t_{bk}$  和  $t_{ck}$  的暂态势能增量。

如果支路  $k$  的  $\Delta V_{PEk}(t_{ck}, t_{bk})$  大于其它的支路,其端电压也将低于其它支路,因此该指标越小,则表明该支路更有可能成为临界支路,同样也显示该支路受到更严重的暂态能量的冲击并更靠近系统的振荡中心。

取支路  $k$  两端电压相角差的时间导数的符号可用以表明相角的运动方向,如果支路  $k$  为临界支路,且满足  $\frac{d\sigma_{ij}}{dt} > 0$ ,则节点  $i$  所在的子网络的发电机相

对于剩余机群超前运动,则该发电机机群即为系统的临界机群,而剩余的发电机机群则为非临界机群。

### 5 识别临界机群的算法

识别临界机群的主要步骤为:(1)根据仿真的输出结果计算网络中每条支路的  $LII_k$ ,并从大到小进行排序。(2)应用 flood-fill 算法识别理解临界割集,具体方法为:首先选择出在网络中具有绝对值最大的  $LII_k$  由大至小支路,如果移去该支路,系统成为一个不连通的图,则该支路构成网络的临界割集,若移去后网络仍为一个连通的图,则依次移去指标  $LII_k$  由大至小的支路,直至网络成为一个不连通的图,则使得网络不连通的支路构成系统的临界割集。(3)根据临界支路的指标的符号,判断出系统中哪些发电机是临界机群,哪些为剩余机群。

### 6 算例

以图5所示的IEEE10机39节点为例,如果三相故障发生于支路5-8上,故障线路切除的时间分

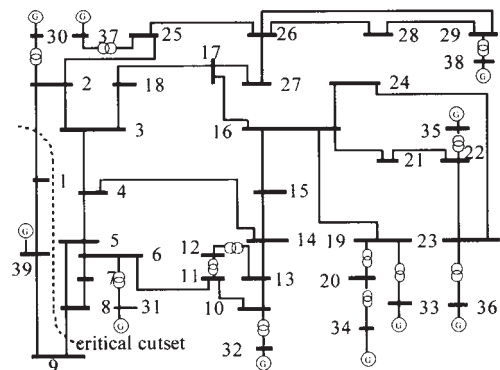


图5 IEEE10机39节点试验系统

别为 0.20 s、0.22 s、0.23 s，其中当故障切除时间为 0.23 s 时，系统失去稳定。则网络中按指标大小排序的前 8 条支路及其指标列于表 1 中。

表 1 网络中识别指标最大的 8 条支路及其指标

排序	$t_c = 0.20\text{ s}$		$t_c = 0.22\text{ s}$		$t_c = 0.23\text{ s}$	
	线路	$LII_k$	线路	$LII_k$	线路	$LII_k$
1	8-9	2.68	8-9	5.26	8-9	148.10
2	1-2	-2.52	1-2	-4.86	1-2	-88.90
3	9-39	1.15	39-1	-1.78	6-7	22.14
4	39-1	1.13	9-39	1.70	7-8	20.00
5	4-5	0.27	4-5	0.48	2-3	5.12
6	2-3	0.22	6-7	0.41	4-5	4.92
7	6-7	0.15	2-3	0.37	39-1	-4.39
8	2-25	0.13	2-25	0.35	9-39	4.21

在表 1 中，具有绝对值最大的识别指标  $LII_k$  是支路 8-9 及 1-2，由 flood-fill 算法可很方便地应用计算机识别出上述 2 支路构成网络中的一个割集，通过指标的符号可判别出系统的 30~38 号发电机在第一摆中超前于 39 号发电机，这些发电机构成系统的临界机群，而 39 号发电机构成系统的剩余机群。

图 6 稳定的情况下，30~38 号发电机均相对于 39 号发电机超前运动。若系统失去稳定的情况下 ( $t_c=0.23\text{ s}$ )，图 7 为部分支路两端相角差的变化曲线，从中也可看出网络的撕裂发生于由支路 8-9 及

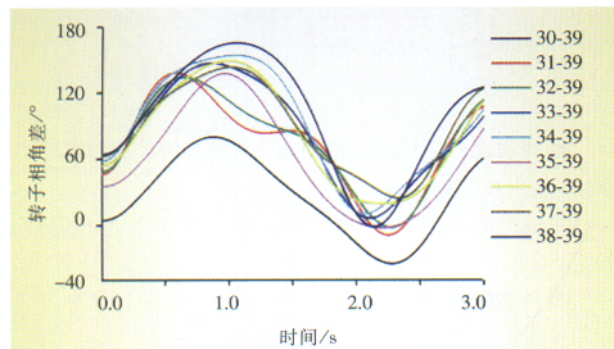


图 6 系统稳定情况下系统中发电机相对于 39 号机的摇摆曲线

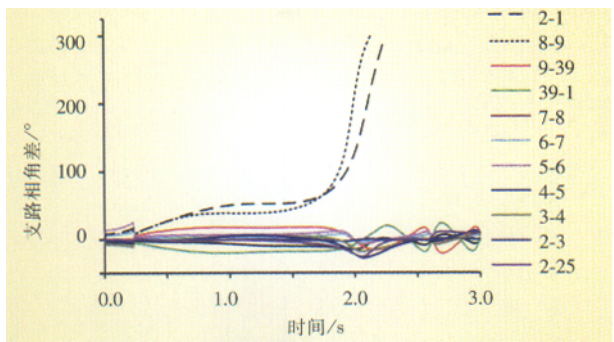


图 7 系统不稳定的情况下支路相角差的变化曲线

1-2 所构成的割集上，也表明本文所提出的识别指标在多机系统应用的有效性。

## 7 结论

提出一种新的识别网络临界割集及系统临界机群的方法，通过建立支路暂态势能的概念，根据暂态能量在网络中分布的规律及系统在振荡过程中电压的变化特点，构造出识别指标对故障后系统中的发电机组进行分群，该方法的主要优点如下：(1)不需要发电机的任何运动信息，识别指标的定义仅依赖于支路上的运行变量。(2)计算方法简单，只需对系统仿真结果进行一次处理，而不需要进行大量的组合分析，减小了计算量，提高了计算速度。(3)在系统稳定及不稳定的情况下均能正确地判别发电机组的分群模式。(4)该方法不仅适用于动态安全分析，同时也可应用于识别网络中的薄弱环节，有利于开展对于 FACTS 以及失步保护的安装地点选择方面的研究。

## 参考文献：

- [1] S N Singh, A K David. Towards dynamic security constrained congestion management in the open power market [J] IEEE Power Engineering Review, 2000, (8): 45-47.
- [2] T Berry, K W Chan, A R Dantels, et al. Real time modeling of multimachine power system [J] IEE Proc, 1993, 140 (5): 241-248.
- [3] F A Rahimi, M G Lauby, J N Wrubel, et al. Evaluation of the transient energy function method for on-line dynamic security analysis [J] IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8 (2): 497-507.
- [4] Chadalavada, V Vittal. Transient stability assessment for network topology changes: application of energy margin analytical sensitivity [J] IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9 (3): 1658-1664.
- [5] Xue Y, Van Cutsum, M Ribbens-Pavella. A simple direct method for fast transient stability assessment of large power systems [J] IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3 (2): 400-412.
- [6] G A Maria, C Tang, J Kim. Hybrid transient stability analysis [J] IEEE Trans on Power systems. 1990, 5 (2): 384-393.
- [7] C K Tang, C E Graham, M El-kady, et al. Transient stability index from conventional time domain simulation [J] IEEE Trans on PWRs, 1994, 9 (3): 1524-1530.
- [8] M H Haque. Hybrid method of determining the transient stability margin of a power system [J] IEE Proceeding, 1996, 143 (1): 27-31.
- [9] Y Yue, Van Cutsum, Ribbens-Pavella. Real-time analytic sensitivity method for transient security assessment and preventive control [J] IEE Proceeding, 1988, 135 (2): 107-117.
- [10] K W Chan, Q Zhou, T S Chung. Transient stability margin assessment for large power system using time domain simulation based on hybrid extended equal area criterion method [A] Proc 5th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and

Management [C] APSCOM' 2000.405-409.

[1] A R Bergen, D J Hill. A structure preserving model for power system stability analysis [J] IEEE Trans on PAS, 1981, 100 (1) 25-35.

[2] Prabha Kundur. Power System Stability and Control [M] McGraw-Hill, Inc. 1994.

[3] Walter A Elmore. Protective Relaying Theory and Applications [M] Marcel Dekker, Inc. 1994.

[4] 林子钊. 基于运行变量的输电网络评价方法及其应用 [D] 吉林:东北电力学院, 2000.

(责任编辑 李 博)

## Approach to identify the critical cluster of machines based on line transient potential energy and voltage

CAI Guo-wei<sup>1</sup>, MU Gang<sup>2</sup>, CHENG Hao-zhong<sup>1</sup>, K W Chan<sup>3</sup>

(1. Electric Power Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 203000, China; 2. Department of Electrical Engineering, Northeast China Institute of Electrical Power Engineering, Jilin 132012, China; 3. Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong SAR, China)

**Abstract:** Reliability and computational simplicity in identification of cluster of critical machines are of primary importance in application of direct and hybrid transient stability assessment methods such as TEF, EEAC and hybrid TEF and hybrid EEAC. In the paper, a new approach is proposed for classifying machines into critical cluster and remaining cluster by identifying critical cutset (the weakest cutset) with quantitative assessment index, which is built on the basis of investigation in the feature of transient potential energy over network injected into the post-fault system and the change of bus voltage after removal of the disturbance. The algorithm only requires variables of line power, bus phase angle and bus voltage along the post-fault trajectory instead of generator dynamic variables. The case studies on the 10 machines 39 buses New England system are given to show the validation of this method.

**Key words:** dynamic security assessment; critical machine; critical cutset; line potential energy

## 《东方自动化网》正式运行

东方自动化网 (www.e-automation.net.cn) 经 1 个多月试运行后, 在电力行业领导的高度评价和祝贺 (详见网站) 及广大同行的支持下已投入正式运行。

东方自动化网是电力行业热工自动化标准化技术委员会和深圳恒双盈电力网络科技有限公司联合主办的中国电力行业自动化专业网站。网站由国家电力公司科技委员, 电力行业热工自动化标准化技术委员会主任委员, 原电力规划设计总院发电处副处长侯子良高级工程师 (教授级) 主持。网站的宗旨是为电力行业从事自动化的管理、科研、设计、施工、调试、运行、维修等的单位及人员服务, 也为自动化设备制造厂商与电力行业用户进行沟通和技术交流服务。网站包括如下栏目:

信息频道: 包括电站建设项目信息以及科研标准化、相关政策、事故与故障等最新信息;

技术交流: 相关期刊的技术文献查阅、设计施工运行中各种热点问题的讨论及新技术新设备的学习;

技术支持: 邀请知名专家对有关技术难题进行咨询解答及技术人才的招聘和推荐;

标准建设: 介绍相关标准化机构、标准的汇集、查找及学习;

企业产品: 自动化设备厂家查询、介绍、产品的查询及推荐;

商务频道: 提供自动化产品的交易信息、求购信息、产品备件维修信息及其它商务活动信息;

行业平台: 介绍电力行业各学术团体、科研设计、施工、运行电厂等单位的相关资料。

该网站既是自动化行业管理的窗口, 又是行业服务的园地。信息内容将随着会员和广大用户的扩大和提出的各种要求而不断充实、改进和提高。网站将努力做好各项信息服务, 为中国电力行业自动化的发展贡献力量。

地址: 北京市地藏庵南巷 1 号

邮编: 100045

电话: 010-68055104

传真: 010-68055103

电子信箱: z1hou@163.com