

一类潮流计算无解的实用性调整研究

李 敏, 陈金富, 陈海焱, 段献忠

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省武汉市 430074)

摘要: 现代电力系统具有远距离、重负荷、大区联网的特点。随着竞争机制的逐步引入, 电网接近极限运行状态, 该状态下的潮流方程易出现无解的情况。文中通过分析电力系统潮流无解问题, 指出潮流无解的原因可以归结为电网的某一条或几条薄弱输电通道超过其输送极限。基于此, 提出一种潮流计算无解时的实用性调整方法: 利用降出力法求得最薄弱的输电通道, 然后通过提高负荷功率因数来确保系统的无功平衡, 并且结合灵敏度来调整发电机出力、切除部分负荷, 使潮流计算得到收敛解。对华中电网的测试验证了该方案的可行性和准确性。

关键词: 潮流无解; 灵敏度; 降出力法; 电力系统

中图分类号: TM744

0 引言

电网规划和故障后的潮流计算易出现不收敛的情况, 这种情况的出现可能是因为计算方法不够完善, 也可能是因为潮流方程本身就无解。而随着我国电网逐步呈现远距离、重负荷、大区联网等特点以及市场竞争的逐步引入, 潮流无解的情况逐渐增多, 解决潮流无解问题将成为潮流计算的重点和难点。

潮流计算方程组通常包括等式约束和不等式约束方程。等式约束方程就是基本潮流方程, 不等式约束方程包括节点电压约束、线路潮流约束等。当等式约束方程无解时, 整个潮流方程肯定无解。本文解决等式约束方程无解时的调整问题, 即在基本潮流方程无解的情况下, 通过调整发电机出力、提高负荷功率因数以及切除部分负荷等措施求得潮流解。目前, 分析计算人员往往只能凭借经验进行调整, 这种传统的人工调整方法效率低下、工作强度大、效果不明显。因此, 迫切需要实现调整的自动化。

文献[1]提出在潮流无解的情况下, 采用不可行解域中的初始点到无解边界的最小欧氏距离来衡量潮流方程式无解的程度。文献[2]在其基础上, 提出了潮流无解时的调整方法。文献[3]提出一种负荷减载算法恢复故障后潮流方程的可解性, 文中先使用阻尼牛顿法求取近似解, 然后利用该近似解的信息识别最弱节点来确定最优减载策略。近年来, 内

点法在计算速度、收敛性、应用范围方面取得了很大的发展^[4,5], 文献[6,7]将潮流无解问题作为非线性规划问题采用内点法求解。文献[8]中提出了潮流计算不收敛时的几条改进措施: 重新选择缓冲机位置, 预先处理不平衡功率, 用灵敏度方法处理电磁环网开断等。总之, 潮流无解调整研究取得了一定的进展, 但仍需要加强其在实际应用方面的研究。文献[8]给出的调整办法具有较强的针对性, 不便应用于大规模电力系统; 文献[2,7]考虑了实际应用中的一些问题, 但本身计算繁琐, 对于大型电力系统易出现“维数灾”, 计算时间较长。

本文结合工程实际提出了一种潮流无解时的自动调整方案。首先从简单系统入手推导出潮流极限计算公式, 然后对复杂系统进行分析, 指出潮流无解的原因可以归结为某一条或几条薄弱输电通道超过其输送极限。基于对潮流无解问题的这些理解, 提出了新的调整方法, 并通过对华中电网的测试验证了该方法的可行性和准确性。

1 潮流无解原因分析

1.1 简单的两节点系统

简单的两节点系统如图 1 所示。节点 1 为发电机节点, 电压相量为 $V_1 \angle 0$, 负荷节点 2 的电压相量为 $V_2 \angle \delta_2$, 负荷功率为 P_2, Q_2 , 电源与负荷点之间的连接阻抗为 $Z_{12} \angle \theta_{12}$ 。

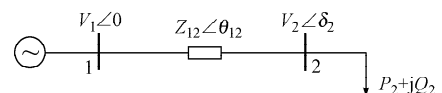


图 1 两节点系统
Fig. 1 A two-bus system

收稿日期: 2005-09-06; 修回日期: 2005-11-14。

国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2004CB217906); 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目; 中国博士后科学基金资助项目(2003034473)。

由图 1 可得:

$$\begin{cases} P_2 = \frac{V_1 V_2}{Z_{12}} \cos(\theta_{12} + \delta_2) - \frac{V_2^2}{Z_{12}} \cos \theta_{12} \\ Q_2 = \frac{V_1 V_2}{Z_{12}} \sin(\theta_{12} + \delta_2) - \frac{V_2^2}{Z_{12}} \sin \theta_{12} \end{cases} \quad (1)$$

在潮流极限处,雅可比矩阵行列式等于 0,即

$$\det \mathbf{J} = \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} - \frac{\partial P_2}{\partial V_2} \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} = 0 \quad (2)$$

此时有:

$$V_2 \cos \delta_2 - 0.5 V_1 = 0 \quad (3)$$

由此可知,当两节点系统超过输送极限时,即 $V_2 \cos \delta_2 - 0.5 V_1 < 0$ 时,潮流无解。

1.2 复杂电力系统

为了对复杂电力系统潮流无解的问题进行分析,首先对通道做出定义:通道是指电网中已知潮流分布的情况下,节点电压相角依次递减的潮流输送路径。在一条通道中,电压相角最大的节点称为通道源节点,电压相角最小的节点称为通道汇节点。通常电力网络中有很多条输电通道,如果每一条通道都没有超过其输送极限,则该系统存在潮流解;相反若至少有 1 条通道超过输送极限,则潮流无解。

图 2 为复杂电力系统中的一条输电通道,由于有多个中间节点,直接应用式(3)进行判断会使结果偏于保守。文献[9,10]对这种含中间节点的输电通道进行了分析和建模,文献[10]提出在下式

$$V_m \prod_{i=1}^{m-1} \cos \delta_{i,i+1} - \frac{1}{2} V_1 = 0 \quad (4)$$

满足时,输电通道达到输送极限。

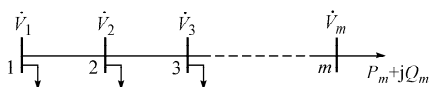


图 2 一条输电通道
Fig. 2 A transmission path

因此,在复杂电力系统中,最薄弱的输电通道即是式(4)等号左边最小的通道。根据定义,输电通道的源节点和汇节点具有这样的特征:源节点电压相角 δ_1 大于其相邻节点电压相角,汇节点电压相角 δ_m 小于其相邻节点电压相角。由此可知,源节点为发电机节点,汇节点为负荷节点。而发电机节点在潮流计算中通常为 PV 节点,所以电压 V_1 为定值。综上所述,在寻找薄弱输电通道时可以进行如下简化:①认为源节点电压 V_1 为定值;②当汇节点电压 V_m 低于某一限值 V_s 时,认为该通道即为要找的薄弱输电通道;③如果所有通道汇节点电压都不低于所设限值,那么选取下式

$$\sum_{i=1}^{m-1} \delta_{i-1,i} = \delta_1 - \delta_m \quad (5)$$

最大的通道,认为该通道即为要找的薄弱输电通道。

2 潮流无解调整方案

根据第 1 节的分析可知,当潮流无解时,如果能在每一次迭代中找出薄弱的输电通道,然后减轻该通道潮流,即可逐渐减轻该通道的负载程度直至潮流计算收敛。由此思路,调整步骤如下:①进行潮流计算,如果收敛则退出计算,否则求出这种情况下的薄弱输电通道;②调整该薄弱输电通道的潮流,转步骤 1。

2.1 求取薄弱输电通道

调整需要先求出电网的薄弱输电通道,而通道的求取又需要有收敛的潮流结果,因此直接求取是不可行的,本文采用降出力法解决这个矛盾。

降出力法将发电机出力 and 负荷大小看做是乘子 k 的线性函数,对所有发电机和负荷均有:

$$\begin{cases} P_i' = k P_i \\ Q_i' = k Q_i \end{cases} \quad (6)$$

式中: i 表示全网所有发电机节点和负荷节点; P_i , Q_i 分别表示节点 i 的注入有功和无功功率; P_i' , Q_i' 分别表示降出力后节点 i 的注入有功和无功功率;乘子 k 满足 $0 < k < 1.0$ 。当 $k=1.0$ 时,节点注入功率为初始大小。因此,降出力法依据 k 值不同在一定程度上减小每个节点的注入功率,继而减少每条通道的输送功率。根据 1.2 节的分析,在得到降出力的潮流结果后,可以近似求出导致初始潮流无解的薄弱输电通道。

2.2 根据灵敏度调整通道潮流

降出力后的潮流结果虽然不是潮流方程的解,但却是一个很好的近似解,而且 k 越接近 1,近似程度越好。本文利用该近似解,采取以下调整措施:

1)在通道汇节点电压较低即受端无功缺额较大的情况下补充无功供给,可采取提高发电机机端电压和增大负荷功率因数等措施。

2)在通道相角差较大的情况下优先考虑调整发电机有功出力。计算该通道相角差对每台发电机有功出力的灵敏度,通常选取灵敏度较大且有一定调整裕度的发电机作为调整发电机。为了维持整个系统的有功平衡,采用反向等量调整措施,即正灵敏度的发电机减小有功出力,负灵敏度的发电机增加同样大小的有功出力。

3)如果不存在负灵敏度发电机,则根据灵敏度调整部分发电机和负荷。与措施 2 相同,为维持整个系统的有功平衡,应等量减小发电机出力和负荷。

反向等量调整^[11]和等量调整措施维持了整个系统的有功平衡,因而平衡机的出力在调整前后基本上不变,有效防止了平衡机出力越限。

2.3 灵敏度计算

根据 2.2 节的分析,计算中采用的基本灵敏度是节点电压相角对节点有功注入的灵敏度。该基本灵敏度的求取,很多文献中都有介绍,这里不再重复。

灵敏度计算根据控制手段不同分为 2 种情况:
1)控制目标 δ 是通道相角差,控制手段 u 是灵敏度相反的 2 台发电机。

将源节点和汇节点组成相角节点对,用反向配对法将正灵敏度发电机节点和负灵敏度发电机节点组成有功注入节点对,两者之间的灵敏度系数可用节点对的互阻抗表示为^[12]:

$$S_{\delta u} = S_{gg+} + S_{lg-} - S_{gg-} - S_{lg+} \quad (7)$$

式中: S_{gg+} 和 S_{gg-} 分别是源节点电压相角对正、负灵敏度发电机的灵敏度; S_{lg+} 和 S_{lg-} 分别是汇节点电压相角对正、负灵敏度发电机的灵敏度。

2)控制目标 δ 是通道相角差,控制手段 u 是一对发电机和负荷。

同理,通道相角差对该控制手段的灵敏度为:

$$S_{\delta u} = S_{gg} + S_{gl} - S_{lg} - S_{ll} \quad (8)$$

式中: S_{gg} 和 S_{gl} 分别是源节点电压相角对减出力发电机和被切负荷的灵敏度; S_{lg} 和 S_{ll} 分别是汇节点电压相角对减出力发电机和被切负荷的灵敏度。

3 算例与分析

以上提出的调整方案已应用在实际电网中,大大减轻了规划分析人员的工作量。本文以华中电网作为测试系统,验证该算法的可行性和有效性。电网接线如图 3 所示,图中粗线表示 500 kV 线路,细线表示 220 kV 线路。

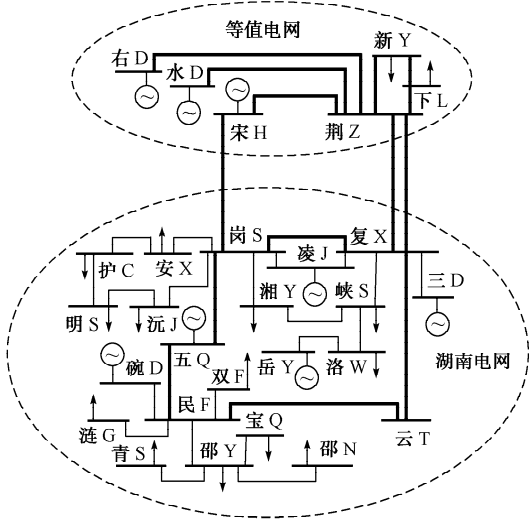


图 3 华中电网接线
Fig. 3 Grid of central China

按负荷增长方式的不同,以下给出 2 个算例。
算例 1 增长单个负荷的有功功率,算例 2 增长选定区域内的所有负荷。调整结果表明该算法计算快速、调整量小、准确性高。

3.1 算例 1

原运行方式为可收敛的正常运行方式,将涟 G 负荷增至初始值的 3 倍,牛顿法潮流计算在迭代 5 次后发散。

首次降出力法潮流计算,当通道乘子 $k=0.9$ 时,潮流计算收敛,此时节点涟 G 的电压为 0.77(标么值;以下数值如没有特别说明一律为标么值),低于给定限值 $V_s(0.8)$,系统基准容量为 100 MVA。因此,将负荷涟 G 的功率因数从 0.95 提高至 0.98。对原有数据进行修改后,重新进行潮流计算,迭代 14 次后潮流仍然发散。再次使用降出力法,当通道乘子 $k=0.9$ 时潮流收敛,求得薄弱输电通道为发电机右 D 到负荷峽 S。为使该通道相角差迅速减小,选取灵敏度和调整裕度乘积最大的元件作为调整元件。表 1 给出了反向等量调整发电机有功出力的迭代过程。

表 1 等量调整发电机有功出力的迭代过程
Table 1 Iterative process with equal amount regulation of generators

调整次数	薄弱通道相角差/rad	控制手段		调整量
		正灵敏度发电机/灵敏度	负灵敏度发电机/灵敏度	
1	0.947 12	右 D/0.013 33	五 Q/−0.013 36	0.50
2	0.933 75	右 D/0.013 34	岳 Y/−0.043 41	0.50
3	0.905 60	右 D/0.013 29	三 D/−0.014 26	0.50
4	0.892 20	右 D/0.013 22	五 Q/−0.013 00	0.50
5	0.879 30	右 D/0.013 17	三 D/−0.013 65	0.50
6	0.866 04	右 D/0.013 12	五 Q/−0.012 69	0.50

迭代 6 次后,已不含有负灵敏度发电机,因而等量减小发电机出力和负荷有功,迭代过程见表 2。

表 2 等量减小发电机出力和负荷有功的迭代过程
Table 2 Iterative process with equal amount curtailment of generators and loads

调整次数	薄弱通道相角差/rad	控制手段		调整量
		发电机/灵敏度	负荷/灵敏度	
1	0.851 83	右 D/0.013 06	涟 G/0.024 78	1.000 00
2	0.815 80	右 D/0.012 90	涟 G/0.021 70	1.000 00
3	0.781 96	右 D/0.012 80	涟 G/0.020 01	0.903 24

从表 1 可以看出,通过减小发电机右 D 的有功出力,增大发电机五 Q、岳 Y 和三 D 的有功出力,使通道右 D 到峽 S 的相角差不断减小。调整过程实际上防止了有功功率的远距离传输,使较远的发电机右 D 减出力,而距离负荷较近的 3 台仍有调整裕

度的发电机增出力。表 2 中控制目标为发电机右 D 至负荷湘 Y 的输电通道。可以看出算法准确地找到了重载节点链 G,并通过减少发电机右 D 出力和负荷链 G 的部分负荷使潮流计算收敛,调整之后牛顿法潮流计算迭代 4 次收敛。整个调整过程耗时 5.3 s。

3.2 算例 2

为了进一步验证调整方案的有效性,增加湖南区域内的所有负荷,负荷的增量由全网发电机按比例分配。当湖南区域内负荷增至原始运行方式的 1.2 倍时,潮流出现发散。根据调整方案,首先调整

通道汇节点电压,即调整负荷功率因数(调整过程见表 3),然后通过调整发电机和负荷来调整通道相角差(调整过程见表 4)。

表 3 电压调整迭代过程
Table 3 Iterative process of voltage regulation

调整次数	控制目标		控制手段	调整量
	节点	电压		
1	护 C	0.727 12	护 C 节点无功	0.316 76
2	安 X	0.726 50	安 X 节点无功	0.618 47
3	明 S	0.747 63	明 S 节点无功	0.290 97
4	沅 J	0.763 25	沅 J 节点无功	0.290 71

表 4 调整发电机和负荷的迭代过程
Table 4 Iterative process of generators and loads regulation

调整次数	控制目标		调整方式	控制手段		调整量
	通道	相角差/rad		控制手段 1/灵敏度	控制手段 2/灵敏度	
1	碗 D-链 G	0.901 38	等量调整	碗 D/0.170 46	链 G/0.027 46	0.910 81
2	碗 D-链 G	0.726 30	等量调整	碗 D/0.159 82	链 G/0.025 41	0.028 08
3	三 D-邵 Y	0.727 14	等量调整	三 D/0.066 56	宝 Q/0.018 42	1.000 00
4	三 D-邵 Y	0.644 54	等量调整	三 D/0.062 14	邵 N/0.017 41	0.789 68
5	三 D-邵 Y	0.582 99	等量调整	三 D/0.059 40	青 S/0.015 07	0.017 17
6	碗 D-双 F	0.720 80	等量调整	碗 D/0.158 12	双 F/0.036 20	0.741 82
7	碗 D-双 F	0.578 91	等量调整	碗 D/0.153 08	链 G/0.010 25	0.013 90
8	凌 J-峡 S	0.709 37	反向等量调整	凌 J/0.099 05	岳 Y/-0.036 64	0.500 00
9	水 D-新 Y	0.702 09	等量调整	水 D/0.019 85	新 Y/0.024 58	1.000 00
10	水 D-新 Y	0.658 20	等量调整	水 D/0.019 67	新 Y/0.023 65	1.000 00
11	水 D-新 Y	0.615 31	等量调整	水 D/0.019 52	新 Y/0.022 90	1.000 00
12	水 D-新 Y	0.573 26	等量调整	水 D/0.019 38	下 L/0.004 37	0.479 59
13	凌 J-峡 S	0.639 41	等量调整	凌 J/0.097 84	峡 S/0.055 76	0.832 49
14	凌 J-峡 S	0.513 08	等量调整	凌 J/0.096 75	洛 W/0.033 61	0.011 92

注:控制手段 1 为发电机减少出力;控制手段 2 为切除负荷或发电机增出力。

I_{alsi} 指标^[6,7]反映了所切有功负荷占全网有功负荷的百分比。已知全网总负荷为 39 599 MW,根据表 4 中提供的负荷逐次切除量,计算切负荷比例为:

$$I_{\text{alsi}} = \frac{P_{\text{orig}} - P_{\text{mod}}}{P_{\text{orig}}} \times 100\% = 1.976\% \quad (9)$$

式中: P_{orig} 表示全网有功负荷; P_{mod} 表示调整后全网的有功负荷。

可见,潮流无解调整保留了原电网的绝大部分负荷,基本维持了负荷水平,较好地解决了潮流计算无解的问题。

4 结语

本文所提出的潮流无解时的实用性调整方法基于降出力法对系统进行潮流计算,不存在“维数灾”问题,计算速度较快,调整过程通常可在数秒内完成;考虑了整个系统的有功平衡,不会出现由于平衡机越限而导致调整方案最终不可行的情况;算法简单,只需在常规潮流计算程序的基础上加入调整的

部分,容易实现。对华中电网数据进行的测试验证了该方法的可行性和准确性,较好地解决了电力系统中的潮流无解问题。

参考文献

[1] OVERBYE T J. A Power Flow Measure for Unsolvable Cases. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1359—1365.
[2] OVERBYE T J. Computation of a Practical Method to Restore Power Flow Solvability. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1): 280—287.
[3] 马平,蔡兴国,于继来,等.基于最小不匹配函数的低压减载算法研究.中国电机工程学报,2005,25(1):27—31.
MA Ping, CAI Xing-guo, YU Ji-lai et al. A Study on a Undervoltage Load Shedding Strategy Based Minimum Mismatch Function. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 27—31.
[4] 覃振成,乐秀,蓝澜,等.基于改进非线性预报-校正内点法的最优潮流.电力系统自动化,2005,29(9):25—30.
QIN Zhen-cheng, LE Xiu-fan, LAN Lan et al. Improved Nonlinear Predictor-corrector Interior Point Method for Optimal Power Flow. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(9): 25—30.

- [5] 袁越,久保川淳司,佐佐木博司,等.基于内点法的含暂态稳定约束的最优潮流计算.电力系统自动化,2002,26(13):14—19.
YUAN Yue, KUBOKAWA J, SASAKI H et al. Interior Point Method Based Optimal Power Flow with Transient Stability Constraints. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(13): 14—19.
- [6] BARBOZA L V, SALGADO R. Restoring Solutions for Unsolvable Cases via Minimum Load Shedding for a Specified Direction. In: Proceedings of 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on Power Industry Computer Applications. Sydney (Australia): 2001. 374—379.
- [7] BARBOZA L V, SALGADO R. Unsolvable Power Flow Analysis—An Approach Based on Interior Point Non-linear Optimization Methods. In: Proceedings of IEEE Porto Power Tech Conference, Vol 2. Porto (Portugal): 2001. 6p.
- [8] 于尔铿,潘毅,王宪荣,等.电力系统潮流收敛性的实用性改进.电网技术,1995,19(1):23—26.
YU Er-keng, PAN Yi, WANG Xian-rong et al. Practical Improvements upon Convergence of Load Flow Calculation. Power System Technology, 1995, 19(1): 23—26.
- [9] GUBINA F, STRMČNIK B. Voltage Collapse Proximity Index Determination Using Voltage Phasors. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 788—794.
- [10] 周念成,钟岷秀,徐国禹,等.基于电压相量的电力系统电压稳

定指标.中国电机工程学报,1997,17(6):425—428.

- ZHOU Nian-cheng, ZHONG Min-xiu, XU Guo-yu et al. Voltage Stability Index in Power System Based on Voltage Phasors. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(6): 425—428.
- [11] 邓佑满,黎辉,张伯明,等.电力系统有功安全校正策略的反向等量配对调整法.电力系统自动化,1999,23(18):5—8.
DENG You-man, LI Hui, ZHANG Bo-ming et al. Adjustment of Equal and Opposite Quantities in Pairs for Strategy of Active Power Security Correction of Power Systems. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(18): 5—8.
- [12] 张伯明,陈寿孙.高等电力网络分析.北京:清华大学出版社,1996.
ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun. Advanced Analysis of Power Network. Beijing, Tsinghua University Press, 1996.

李 敏(1982—),女,硕士研究生,主要研究方向为最优潮流、电力系统规划。E-mail: limin_8899@163.com

陈金富(1972—),男,副教授,主要研究方向为电力系统规划、运行以及 FACTS 应用技术。E-mail: jinfu_chen@263.net

陈海焱(1979—),男,博士研究生,主要研究方向为分布式发电技术、电力系统规划与运行。

Load Flow Regulation for Unsolvable Cases in a Power System

LI Min, CHEN Jin-fu, CHEN Hai-yan, DUAN Xian-zhong

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The modern power system has its unique characteristics of long distance, heavily loaded and regional connected transmission framework. Owing to the above and the gradual deregulation of the power system, it is becoming increasingly necessary for the system to operate much closer to its loading limits. In this state, power flow equations are apt to have no real solution. By analyzing unsolvable cases in power systems, the reason for unsolvability is pointed out in this paper, that is, the transmission limit of a certain path or several weak paths has been violated. Based on this, an algorithm is proposed to regulate the parameters so as to return to the solvable region. First, find the weakest transmission path by reducing generators and loads. Then, enhance the power factors of loads to ensure the balance of the reactive power. Finally, based on the sensitivities, reschedule the active power of generators while shedding loads to get the convergent resolution of the power flow. The feasibility and veracity of the algorithm is demonstrated in the power grid of Central China.

This work is jointly supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217906), the Teaching and Research Award Program for Outstanding Young Teachers in Higher Education Institutions of MOE, P.R.C., and Post-doctoral Science Foundation of China (No. 2003034473).

Key words: unsolvable power flow; sensitivity; power reducing algorithm; power system

2006 全国电力系统自动化学术研讨会征文通知

为了充分发挥学会的学术交流主渠道作用,交流研讨电力系统自动化技术的应用经验和研究成果,促进电力系统自动化技术水平的不断提高,为相关单位和专业科技工作者提供活跃学术思想、交流技术经验、发表研究心得的讲坛,中国电机工程学会电力系统自动化专委会拟于今年第4季度举办“2006 全国电力系统自动化学术研讨会”。现向全国从事电力系统自动化科技工作者征文,有关事项通知如下。

征文范围包括:电网调度自动化技术,电力系统仿真技术,远动及厂站自动化技术,配电自动化技术,供用电自动化技术等。要求应征论文是尚未公开发表的论文。每篇字数为6000字左右,内容摘要不少于200字。论文以附件形式发送到中国电力科学研究院《电网技术》杂志社,邮箱 dwjs@epri.ac.cn,联系人:陈树勇,王静媛;电话:(010)62916910,62913201-2911。投稿截止时间为2006年7月31日。论文经专家评审后,录用通知8月31日前发出。会议具体时间、地点另行通知。