

基于抗差理论的 P-Q 分解状态估计算法

卢志刚, 张宗伟, 杨斌

(燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 状态估计是能量管理系统(EMS)的重要组成部分, 提高状态估计的计算精度具有重要意义, 基于此, 在当前状态估计计算中广泛应用的 P-Q 分解法的基础上, 应用抗差估计理论中的极大似然型估计(M估计), 构造出一组权函数, 从第二次迭代计算开始, 根据每次迭代计算后各量测量残差与量测量自身之比的大小, 对相应加权值进行修正, 使不良数据的权值越来越小, 达到弱化不良数据对后续迭代过程影响的目的。最后, 以某地区的 220 kV 电网为实际背景, 通过 Matlab 编程仿真, 与 P-Q 分解的估计数据相比较, 证明该改进方法简单实用, 并在提高状态估计的估计精度和自动弱化不良数据影响上有很好的效果。

关键词: 状态估计; P-Q 分解; 抗差; 电力系统

P-Q decoupled state estimation algorithm based on robust theory

LU Zhi-gang, ZHANG Zong-wei, YANG Bin

(School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: State estimation is an important part of EMS, it has important sense in advancing the calculation precision of state estimation. Based on the widely employed P-Q decoupled state estimation method, and M-estimation in robust theory, a set of weight function is conformed, and then the weight value is corrected referring to the ratio between measurement's residual and measurement from the second calculation. Therefore the weight value of the bad data is less and less, and the bad data's effect to after calculation is weakened. Finally, taking one area's 220kV power network as real background and doing simulation experiment using Matlab, it is proved that the new method is simple and practical, and has a good effect in advancing calculation precision of state estimation and weakening the bad data's effect.

Key words: state estimation; P-Q decoupled; robust; power system

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)03-0020-05

0 引言

随着电力系统的迅速发展, 自动化水平的不断提高, 为了保证电力系统运行的安全性和经济性, 能快速、准确地掌握电力系统的运行状态就显得尤为重要, 而电力系统状态估计作为一种根据冗余量测量求解整个系统运行状态量的方法, 自 20 世纪 70 年代被提出以来, 就日益受到人们的重视^[1,2]。

其中, 状态估计算法是状态估计程序的核心部分, 它的选择对整个状态估计程序的性能有很大影响。目前的状态估计算法有很多, 除了基本加权最小二乘法、P-Q 快速分解法、正交变换法、混合算法、Hachtel's 算法以及非二次估计准则外, 人们还在此基础上进行了很多其它的研究(参见文献[3]~[7])。但在工程实践中广泛应用的仍然是基本加权最小二乘法和 P-Q 分解法。

本文将应用抗差估计理论的思想^[8], 在现有 P-Q 分解法的基础上, 构造权函数对加权值作一些处理, 并以河北秦皇岛市 220 kV 主网为实际背景, 用改进算法作仿真算例分析, 验证其实用效果。

1 改进 P-Q 快速分解法

1.1 P-Q 快速分解法^[1]

由于电力系统的有功与电压模值、无功与电压相角之间联系很弱, 因此可以把状态向量分解成电压模值与电压相角两部分, 即 $x = [\theta \ u]^T$, 于是量测量向量也要作相应的变换 $z = [z_a, z_r]^T$, 其中 z_a 表示有功量测, z_r 表示无功、电压模值量测。

于是非线性测量方程 $z = h(x) + v$, 可写成式(1)形式, v 为量测误差向量。

$$z = \begin{bmatrix} z_a \\ z_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_a(\theta, u) \\ h_r(\theta, u) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

再假定各支路两端的相角差很小, 各节点电压模值接近于系统参考节点电压 U_0 , 则信息矩阵就变为常数矩阵, 不必在每次迭代时都重新计算, 从而大大减少了计算量, 加快了计算速度。

1.2 修正加权值

在现有的状态估计方法中, 对于量测量加权值的选取一般遵循以下原则, 先通过对量测量的多次采样, 计算出该量测量的标准差 σ_i , 然后就将该量测量的权值定为 $R_i^{-1} = \frac{1}{\sigma_i^2}$, 但是这样就存在一些问题, 标准差 σ_i 大的量测量的相对标准差 (标准差/量测量) 却未必大, 而标准差 σ_i 小的量测量的相对标准差却未必小, 例如, 某一量测量为 200, 它的标准差为 2, 而同一类型的另一量测量为 20, 它的标准差也为 2, 按照传统权值的确定方法, 这两个量应该具有相同的权值。但很明显第一个量测量的相对标准差是 1%, 而第二个是 10%, 而且, 在每次的估计计算中, 量测量和真值之间的量测误差总是和标准差有一定偏离的, 所以让它们在计算中占有相同的权重是有待改进的。

抗差估计理论, 就是在粗差 (即本文中量测量的残差) 不可避免的情况下, 选择估计方法尽可能减免粗差对未知量估计值的影响, 得出正常模式下的最佳估值, 其中极大似然型估计是抗差估计中最基本的估计方法, 而该方法抗差效果的好坏关键在于建立恰当的权函数^[8]。

抗差估计理论, 就是在粗差 (即本文中量测量的残差) 不可避免的情况下, 选择估计方法尽可能减免粗差对未知量估计值的影响, 得出正常模式下的最佳估值, 其中极大似然型估计是抗差估计中最基本的估计方法, 而该方法抗差效果的好坏关键在于建立恰当的权函数^[8]。

下面就运用极大似然型估计 (M 估计) 的思想构造出一组权函数 (以 R_a^{-1} 为例), 如式(2), 以修正加权值, 总的来说, 就是对残差绝对值大的量测量, 通过对其加权值的处理, 逐步减小、弱化它对后续迭代过程的影响, 使得最终获得更为精确的状态估计结果。

这里的残差是指在每次迭代终了时量测量与该次迭代结果所得的量测估计量之差, 残差绝对值大的量测的权值会被减小, 从而在下一次迭代中的影响也随之减小, 如此迭代下去直到收敛为止。

加权对角矩阵中: R_a^{-1} 为对应 $h_a(x)$ 的加权矩阵; R_r^{-1} 为对应 $h_r(x)$ 的加权矩阵。

在以后的迭代计算中, 各加权值在第一次迭代计算中使用给定的初始值, 从第二次迭代计算开始, 将对各个加权值进行修正后再使用。

具体做法如下: 以 R_a^{-1} 为例, 先进行第一次迭代计算, 终了时得到各个量测量 z_i (此处为有功功率值) 的一个估计值 h_i , 对应残差 $r_i = |z_i - h_i|$, 该量测量此时的加权值用 R_{ai}^{-1} 表示, 首先判断 $|z_i|$ 的大小, 取 $c = 1$, 当 $|z_i| < c$ 时, 其相应加权值保持不变, 当 $|z_i| \geq c$ 时, 将该量测量的加权值修正为 \tilde{R}_{ai}^{-1} :

$$\tilde{R}_{ai}^{-1} = \begin{cases} R_{ai}^{-1} & 0 \leq \left| \frac{r_i}{z_i} \right| \leq m \\ \left(1 - \left| \frac{r_i}{z_i} \right| \right) R_{ai}^{-1} & m < \left| \frac{r_i}{z_i} \right| \leq n \\ \left(1 - \left| \frac{r_i}{z_i} \right| \right)^2 R_{ai}^{-1} & n < \left| \frac{r_i}{z_i} \right| < 1 \\ 0.001 & 1 \leq \left| \frac{r_i}{z_i} \right| \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: m, n 均为 0—1 之间的常数, m, n 的取值将直接关系到对加权矩阵的修正, 从而影响估计结果。一般而言, m 的取值范围一般为 $0 < m \leq 0.02$, n 的取值范围一般为 $0.02 < n \leq 0.2$ 。

这里选择 $m = 0.01, n = 0.1$ 。当 $\left| \frac{r_i}{z_i} \right| \geq 1$ 时, 表示残差值过大, 量测量极有可能是不良数据, 应该使它的权值尽量小, 这里令其为 0.001。

于是第二次迭代的加权矩阵中各加权值变为 \tilde{R}_{ai}^{-1} , 依此类推, 在以后每次迭代计算完成后都要对加权矩阵进行一次修正, 直到迭代收敛完成。

对 R_r^{-1} 的处理与 R_a^{-1} 相同。

2 程序流程

该算法的具体程序流程如图 1 所示。

图 1 中: 框 3 中 KP 与 KQ 分别为有功、无功迭代的收敛标志, 1 为未收敛, 0 为收敛, L 为迭代计数器; 框 5 为逐个判断 $|z_i|$ 大小, 对于 $|z_i| \geq c$ 的将优化其加权值, 直到对每一个 $|z_i|$ 都处理完毕; 框 8 为检查有功迭代是否收敛; 若不收敛则由框 9 置 $KP = 1$, 并修正 θ 值; 若收敛则由框 10 给出 $KP = 0$, 随即转入框 11 检查无功迭代收敛标志; 如果无功迭代也已经收敛, 则程序转出口, 否则进入框 12, 开始进行无功迭代; 框 12—框 16 的内容与有功迭代相仿, 不再详述。若有功、无功迭代都已收敛, 则程序转出口, 否则由框 16 返回框 4, 作下一次迭代。

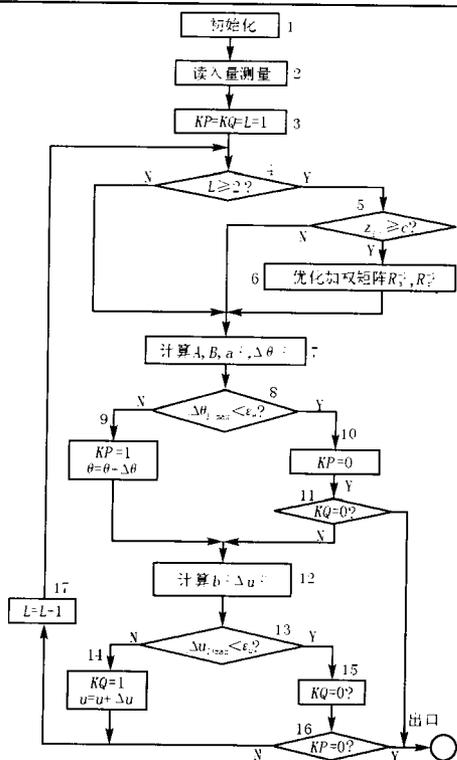


图1 算法程序流程

Fig.1 Flow chart of the algorithm

各量测量的标准差 σ_i 、权重 R_i^{-1} 如表 1、表 2 所示。

表 1 有功功率量测数据

Tab.1 Measurement data of active power

编号	量测项目	量测值	量测误差	真值	标准差	权重
1	P1	-66.62	-1.30	-65.32	1.9	0.28
2	P2	-42.1	1.23	-43.33	0.55	3.31
3	P3	-96.29	-1.70	-94.59	2.01	0.25
4	P3_7	-204.7	2.18	-206.88	3.18	0.10
5	P4	129.3	3.84	125.46	2.14	0.22
6	P4_9	69	3.92	65.08	1.28	0.61
7	P5	146.6	-2.12	148.72	1.12	0.80
8	P6	147.9	-3.84	151.74	3.24	0.10
9	P7	-191.36	0.99	-192.35	2.99	0.11
10	P7_10	59.38	1.37	58.01	0.78	1.64
11	P9	-61.55	-3.37	-58.18	1.12	0.80
12	P9_10	1.86	1.46	0.40	1.56	0.41
13	P10	-123.04	1.67	-124.71	2.67	0.14
14	P10_11	14.67	0.46	14.21	0.77	1.69
15	P10_12	-80.95	-2.78	-78.17	1.78	0.32
16	P11_12	-114.62	-12.61	-102.01	2.14	0.22
17	P7_4	-60.04	0.04	-60.08	1.54	0.42
18	P7_5	-146.21	1.89	-148.10	1.89	0.28
19	P7_6	-146.9	3.46	-150.36	1.46	0.47

表 2 无功功率及电压模值量测数据

Tab.2 Measurement data of reactive power and voltage

编号	量测项目	量测值	量测误差	真值	标准差	权重
1	Q1	-1.23	-0.68	-0.55	0.68	2.16
2	Q2	-6.64	-1.13	-5.51	1.13	0.78
3	Q3	-6.42	-1.45	-4.97	1.55	0.42
4	Q3_7	-15	-2.08	-12.92	2.08	0.23
5	Q4	10	-3.74	13.74	2.04	0.24
6	Q4_9	-2.2	1.55	-3.75	0.55	3.31
7	Q5	3	-3.72	6.72	1.12	0.80
8	Q6	25	-1.84	26.84	1.84	0.30
9	Q7	-11.7	-1.09	-10.61	1.99	0.25
10	Q7_10	0.1	1.43	-1.33	1.33	0.57
11	Q9	10.39	-2.12	12.51	2.12	0.22
12	Q9_10	3.78	0.98	2.8	0.98	1.04
13	Q10	18.07	1.67	16.4	2.67	0.14
14	Q10_11	-14.12	-2.36	-11.76	1.36	0.54
15	Q10_12	16.16	2.78	13.38	1.78	0.32
16	Q11_12	16.1	-22.14	38.24	1.14	0.77
17	Q7_4	-14	4.54	-18.54	1.54	0.42
18	Q7_5	-5.75	0.89	-6.64	0.89	1.26
19	Q7_6	-30.27	-3.46	-26.81	2.46	0.17
20	V7	223.53	1.53	222	1.11	0.81
21	V9	223.63	1.65	221.98	1.11	0.81
22	V11	222.65	1.65	221	1.11	0.81

3 仿真算例及结果分析

下面就以河北秦皇岛地区 220 kV 主网为实际背景，用 Matlab 编制状态估计程序，验证改进后算法的效果，电网结构如图 2 所示。

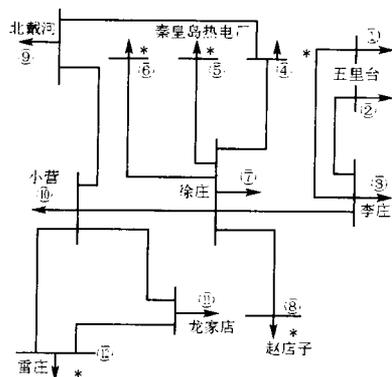


图 2 秦皇岛地区 220 kV 电网结构图

Fig.2 220 kV power network configuration of Qinhuangdao

该电网共有节点 12 个，其中带有*的节点为电源节点，其余均为负荷节点，计算时选取④节点为参考节点，各节点处母线初始电压均取为 222 kV，量测量总计 41 个，待求状态量总计 23 个。

量测量的量测值、真值以及由量测模拟得到的

表3 有功功率估计数据

Tab.3 Estimation data of active power

编号	量测项目	P-Q法估计值	P-Q法估计精度	改进算法估计值	改进算法估计精度	改进算法的效果
1	P1	-66.58	-1.26	-66.57	-1.25	-0.01
2	P2	-43.10	0.23	-43.13	0.20	-0.03
3	P3	-97.26	-2.67	-97.04	-2.45	-0.22
4	P3_7	-207.01	-0.13	-206.82	0.06	-0.07
5	P4	128.03	2.57	125.23	-0.23	-2.34
6	P4_9	61.92	-3.16	60.08	-5.00	1.84
7	P5	147.68	-1.04	147.91	-0.81	-0.23
8	P6	152.28	0.54	152.20	0.46	-0.08
9	P7	-193.41	-1.06	-193.18	-0.83	-0.23
10	P7_10	59.38	1.37	59.22	1.21	-0.16
11	P9	-58.73	-0.55	-56.82	1.36	0.81
12	P9_10	2.84	2.44	2.92	2.52	0.08
13	P10	-126.92	-2.21	-126.01	-1.30	-0.91
14	P10_11	13.86	-0.35	14.02	-0.19	-0.16
15	P10_12	-78.59	-0.42	-77.91	0.26	-0.16
16	P11_12	-107.97	-5.96	-105.71	-3.70	-2.26
17	P7_4	-66.04	-5.96	-65.09	-5.01	-0.95
18	P7_5	-147.41	0.69	-147.64	0.46	-0.23
19	P7_6	-151.91	-1.55	-151.83	-1.47	-0.08

表4 无功功率及电压模值估计数据

Tab.4 Estimation data of reactive power and voltage

编号	量测项目	P-Q法估计值	P-Q法估计精度	改进算法估计值	改进算法估计精度	改进算法的效果
1	Q1	-1.14	-0.59	-1.24	-0.69	0.1
2	Q2	-6.40	-0.89	-6.66	-1.15	0.26
3	Q3	-6.37	-1.40	-5.22	-0.25	-1.15
4	Q3_7	-14.34	-1.42	-13.55	-0.63	-0.80
5	Q4	19.48	5.74	9.77	-3.97	-1.77
6	Q4_9	-9.24	-5.49	-12.98	-9.23	3.73
7	Q5	6.08	-0.64	8.03	1.31	0.67
8	Q6	26.43	-0.41	26.28	-0.56	0.15
9	Q7	-10.36	0.25	-10.50	0.11	-0.14
10	Q7_10	0.90	2.23	-1.45	-0.12	-2.11
11	Q9	9.69	-2.82	13.71	1.20	-1.62
12	Q9_10	-0.28	-3.08	0.04	-2.76	-0.32
13	Q10	4.00	-12.40	14.33	-2.08	-10.33
14	Q10_11	-5.25	6.51	-4.50	7.26	0.76
15	Q10_12	9.43	-3.95	16.97	3.59	-0.36
16	Q11_12	30.73	-7.51	39.87	1.63	-5.88
17	Q7_4	-28.29	-9.75	-22.35	-3.81	-5.93
18	Q7_5	-4.06	2.58	-6.00	0.64	-1.94
19	Q7_6	-24.25	2.56	-24.10	2.71	0.15
20	V7	222.02	0.02	221.98	-0.02	0
21	V9	221.91	-0.07	221.94	-0.04	-0.03
22	V11	221.99	0.99	221.99	0.99	0

表3、表4分别列出在采用传统P-Q分解法和

本文所述改进的P-Q分解法两种算法的情况下,状态估计的结果以及对比情况。其中,P-Q法估计精度用 r_i1 表示, $r_i1 = \text{P-Q法估计值} - \text{真值}$;改进算法估计精度用 r_i2 表示, $r_i2 = \text{改进算法估计值} - \text{真值}$;改进算法的效果用 $|r_i2| - |r_i1|$ 表示,当 $|r_i2| - |r_i1|$ 的值为负数并且越小时,说明改进算法的效果越好。

表3、表4中的 $|r_i2| - |r_i1|$ 的值大多为负数,说明该改进算法在提高估计数据精度方面具有较好的效果,尤其是表4中对于无功功率的估计值,改进算法后估计结果的精度明显提高。

另外,P11_12和Q11_12的量测误差分别达到12.61和22.14,是两个不良数据,当改进算法后P11_12的估计精度由-5.96提高到-3.70,Q11_12的估计精度由-7.51提高到1.63,可见,改进算法还具有自动弱化不良数据影响的功能。

4 结论

本文提出的改进算法只需在原P-Q快速分解法状态估计程序的基础上作一些添加和修改即可实现,简单实用,不但能明显提高估计数据精度,还具有自动弱化不良数据影响的功能。这里用来修正加权值的权函数是该改进算法的核心,它将直接影响到改进算法的效果,为此,总结出功能更强、修正更为合理的权函数将是继本文之后下一步研究工作的重点。

参考文献

- [1] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京:水利电力出版社,1985.
YU Er-keng. Power System State Estimate[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985.
- [2] 诸骏伟. 电力系统分析[M]. 北京:中国电力出版社, 1995.
ZHU Jun-wei. Power System Analysis[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- [3] 钱峰, 龚庆武. 基于IGG法的电力系统状态估计[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 36-39.
QIAN Feng, GONG Qing-wu. State Estimation of Power System Based on IGG Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 36-39.
- [4] 刘浩, 戴居丰. 基于系统分割的保留非线性快速P-Q分解状态估计法[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 72-76.
LIU Hao, DAI Ju-feng. System Partition Based State Estimation Algorithm Using Fast Decoupled P-Q and Retaining Nonlinearity[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 72-76.
- [5] 李碧君, 薛禹胜, 顾锦汶, 等. 基于权函数的电力系统状

- 态估计算法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(8): 32-34.
- LI Bi-jun, XUE Yu-sheng, GU Jin-wen, et al. Weight Function Based Power System State Estimation Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(8):32-34.
- [6] 黄彦全, 肖建, 李云飞, 等. 支持向量机在电力系统状态估计中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 256-260.
- HUANG Yan-quan, XIAO Jian, LI Yun-fei, et al. A State Estimation for Power System Using Support Vector Regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 256-260.
- [7] 杜正春, 牛振勇, 方万良. 基于分块 QR 分解的一种状态估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 50-55.
- DU Zheng-chun, NIU Zhen-yong, FANG Wan-liang. A Block QR Based Power System State Estimation Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 50-55.
- [8] 杨元喜. 抗差估计理论及其应用[M]. 北京: 八一出版社, 1993.

收稿日期: 2006-09-07

作者简介:

卢志刚(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统经济运行及分析研究;

张宗伟(1981-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统状态估计和理论线损计算研究; E-mail: zzw330331@163.com

杨斌(1981-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统无功优化和状态估计研究。

(上接第 5 页 continued from page 5)

通过观察仿真波形可知使用基于故障分量的分相电流相位差动原理判别、动作要比前者快。由于故障分量不受两侧系统电势相角差等运行条件的影响, 故半个周波之后的数据已趋于稳定, 故此原理能够在 1 到 2 个周波之内可靠判别故障并正确动作。

5 结论

1) 本文提出的用贝瑞隆法实现的分相电流相位差动新原理和基于故障分量的分相相位差动新原理不受线路分布电容的影响, 解决了分布电容影响电流相位差动纵联保护的难题。

2) 本文提出的新原理解决了传统的相差高频保护判别所有故障类型的灵敏度不同, 无选相功能等问题。

3) 仿真计算证明此新原理是正确、可靠的, 同时具有很高的灵敏度。证明了分相相位差动这种卓越的保护原理尤其适用于超高压和特高压的长距离输电线路。

4) 本文提出的两个新原理需要的数据通信量大大减少, 为提高通信速率和采样率创造了有利条件。

5) 电流互感器饱和会影响测得线路二次侧电流精确度, 对任何保护都有影响, 这是一个专门的问题。由于篇幅所限本文未对电流互感器的影响加

以阐述。

参考文献

- [1] 郭征. 特高压长线路分相电流差动保护新原理(博士学位论文)[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- GUO Zheng. New Principle of Phase Segregated Current Differential Protection for UHV Long Transmission Lines, Doctoral Dissertation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [2] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理(增订版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004. 171-201.
- HE Jia-li, SONG Cong-ju. Principles of Protective Relaying in Electric Power Systems[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004. 171-201.
- [3] 束洪春, 司大军, 陈学允. 基于分布参数模型的串补线路故障测距方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 72-76.
- SHU Hong-chun, SI Da-jun, CHEN Xue-yun. Study on Locating Faults on Series Compensated Lines Based on Distributed Parameter Line Model[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 72-76.

收稿日期: 2006-08-02; 修回日期: 2006-10-24

作者简介:

徐松晓(1981-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: beyondyesterday@163.com

贺家李(1925-), 男, 教授, 中国电机工程学会名誉理事, IEEE 高级会员, 俄罗斯工程院外籍院士, 主要研究方向为电力系统故障分析与继电保护;

李永丽(1963-), 女, 教授, 主要研究方向为电力系统继电保护和变电站综合自动化。