

不同短路故障下综合负荷模型参数的可辨识性研究

王 婷¹, 郭 磊²

(1.江苏省电力公司宿迁供电公司, 宿迁市发展大道 58 号 223800;

2.上海市电力公司金山供电公司, 上海市金山区金山大道 2522 号 200540)

摘 要: 针对电力系统中综合负荷模型参数辨识, 在不同的短路故障下, 即单相短路、两相间短路、两相接地短路、三相短路, 分析其参数的可辨识性。文中采用基于轨迹灵敏度的可辨识性分析方法, 采用不同的观测变量进行对比研究, 即发电机相对功角、线路的有功功率、线路的无功功率以及母线的电压。结果表明, 对于不同的短路故障, 无论采用何种观测变量, K_L 、 P_{MP} 和 X_s 都是唯一可辨识的, 即短路故障的类型对于综合负荷模型参数的可辨识性是没有影响的。采用粒子群算法, 对 IEEE 9 节点系统进行了验证。

关键词: 综合负荷模型; 参数辨识; 轨迹灵敏度

0 引言

在电力系统的运行过程中, 应用比较广泛的机理动态负荷模型主要有两种: 经典负荷模型和综合负荷模型。

经典负荷模型是一种间接考虑配电网的机理动态模型, 前人已有很多研究, 这个负荷模型是电力系统综合稳定计算 (PSASP) 程序中的标准模型。近年来, 中国电科院提出了一种直接考虑配电网的机理动态模型, 即综合负荷模型, 是一种更加符合实际电力系统的负荷模型^[1-4]。

文献[5]提出并证明了根据灵敏度的相位来判断参数可辨识的思路, 并将其应用于电力系统负荷参数的可辨识分析中。随着基于PMU技术的广域测量系统 (WAMS) 的广泛应用, 可以测量获得全系统的广域相量, 而且是实时动态的数据, 为电力系统负荷建模提供了新的技术手段^[6, 7]。

本文在不同的短路故障下, 采用不同的观测变量, 对综合负荷模型的参数进行可辨识性分析, 采用粒子群算法, 对其进行了辨识, 算例结果验证了结论的可靠性。

1 综合负荷模型与参数

在当前的电力系统仿真计算中, 负荷一般接在 220kV 变电站的 220kV 母线或 110kV 母线侧。但是,

在实际的电力系统中, 无论是电动机负荷还是静态负荷都不可能直接接在 220kV 母线或 110kV 母线上, 而是经过 110kV/10kV 输电网来供电的。因此, 在负荷模型中有必要考虑配电网的影响。

考虑配电网支路的综合负荷模型结构如图 1 所示, 下面简称为 SLM, 是 Synthesis Load Models 的缩写。该模型中除了模拟了等值静态负荷和等值电动机负荷, 还考虑了等值配电网以及电容补偿。在中间设置了一个虚拟母线, 虚拟母线与实际负荷母线之间是 (输) 配电网的等值阻抗^[5-9]。

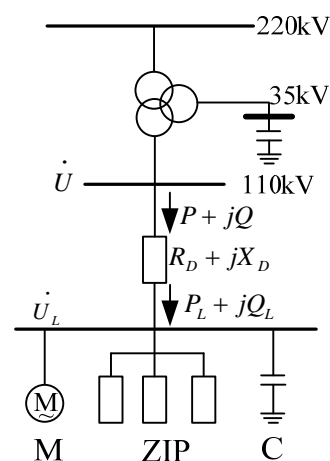


图 1 SLM 模型结构图

感应电动机采用计及机电暂态的三阶模型, 即

$$\begin{aligned}\frac{dE'_d}{dt} &= -\frac{1}{T'_{d0}}[E'_d + f(X - X')I_q] - (\omega - f)E'_q \\ \frac{dE'_q}{dt} &= -\frac{1}{T'_{d0}}[E'_q - f(X - X')I_d] + (\omega - f)E'_d \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{T_J}(T_E - T_M)\end{aligned}\quad (1)$$

式中:

$$X = X_s + X_m \quad (2)$$

$$X' = X_s + \frac{X_m X_s}{X_m + X_s} \quad (3)$$

$$T'_{d0} = \frac{X_m + X_r}{R_r} \quad (4)$$

定子电流方程:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_L - \dot{E}'}{R_s + jfX'} \quad (5)$$

电磁转矩为:

$$T_E = \frac{P_E}{\omega} = \frac{E'_d I_d + E'_q I_q}{\omega} \quad (6)$$

机械转矩为:

$$T_M = (A\omega^2 + B\omega + C)T_{M0} \quad (7)$$

且满足

$$A\omega_0^2 + B\omega_0 + C = 1.0 \quad (8)$$

式中, ω 为转子角速度, E'_d 、 E'_q 分别为同步

坐标下的直轴、交轴暂态电势, X 为稳态电抗, X' 为暂态电抗, X_m 为激磁电抗, R_s 为定子电阻, X_s 为定子电抗, R_r 为转子电阻, X_r 为转子电抗, T'_{d0} 为转子绕组时间常数, T_J 为惯性时间常数, K_L 为负载率, A 、 B 、 C 为机械矩系数, T_{M0} 为初始机械转矩。

2 不同短路故障下综合负荷模型发电机参数的可辨识性分析

本文采用 IEEE-9 节点系统作为研究对象,如图 2 所示。母线 bus-5 负荷模型采用综合负荷模型,感应电动机采用具有典型参数的三阶机电暂态模型,参数包括感应电动机比例 P_{MP} 、定子电抗 X_s 和负载率 K_L [10-14]。

故障是线路 7-8 的中点分别发生瞬时性单相短

路、两相间短路、两相间接地短路、三相短路,持续时间 0.06 秒。利用 PSASP 软件仿真计算得到系统动态轨迹,以发电机相对功角、线路的有功功率、线路的无功功率和母线的电压作为观测变量。

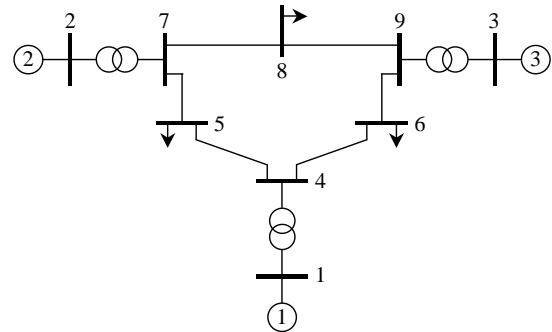


图 2 算例系统图

2.1 单相短路

在不同的观测变量下,分别研究母线 bus-5 上的负荷参数 K_L 、 P_{MP} 和 X_s 的轨迹灵敏度。

结果表明,采用不同的观测变量, K_L 、 P_{MP} 和 X_s 都是唯一可辨识的,以 2#和 1#发电机相对功角为例,轨迹灵敏度曲线见图 3。

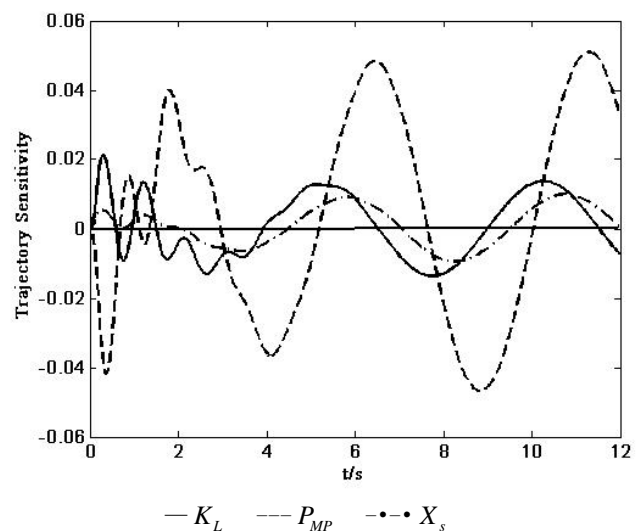


图 3 参数轨迹灵敏度曲线

2.2 两相间短路

在不同的观测变量下,分别研究母线 bus-5 上的负荷参数 K_L 、 P_{MP} 和 X_s 的轨迹灵敏度。

结果表明,采用不同的观测变量, K_L 、 P_{MP} 和 X_s 都是唯一可辨识的,以 2#和 1#发电机相对功角为例,轨迹灵敏度曲线见图 4。

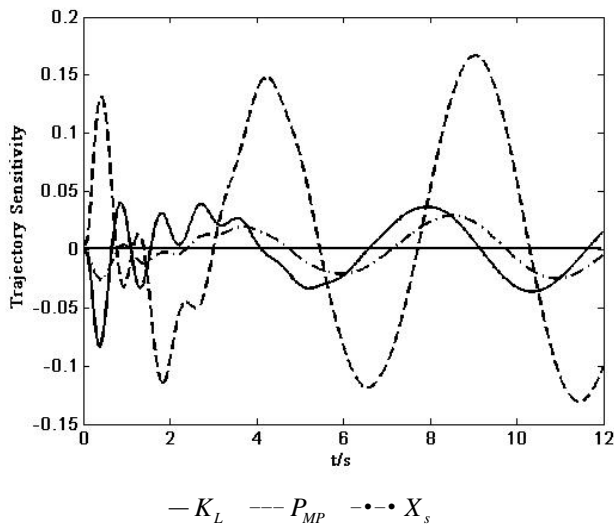


图 4 参数轨迹灵敏度曲线

2.3 两相对地短路

在不同的观测变量下，分别研究母线 bus-5 上的负荷参数 K_L 、 P_{MP} 和 X_s 的轨迹灵敏度。

结果表明，采用不同的观测变量， K_L 、 P_{MP} 和 X_s 都是唯一可辨识的，以 2#和 1#发电机相对功角为例，轨迹灵敏度曲线见图 5。

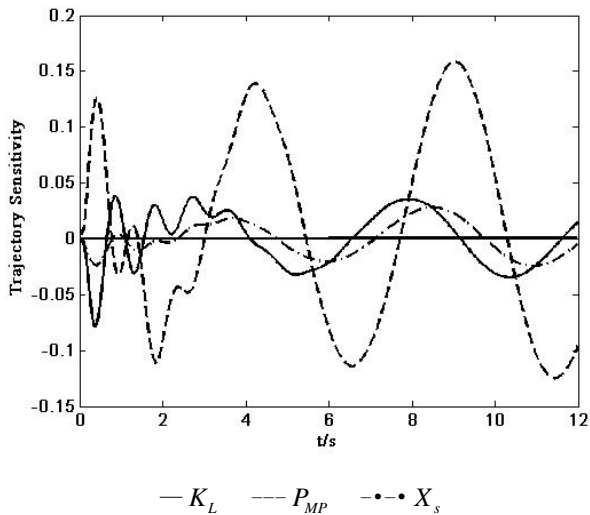


图 5 参数轨迹灵敏度曲线

2.4 三相短路

在不同的观测变量下，分别研究母线 bus-5 上的负荷参数 K_L 、 P_{MP} 和 X_s 的轨迹灵敏度。

结果表明，采用不同的观测变量， K_L 、 P_{MP} 和 X_s 都是唯一可辨识的，以 2#和 1#发电机相对功角为例，轨迹灵敏度曲线见图 6。

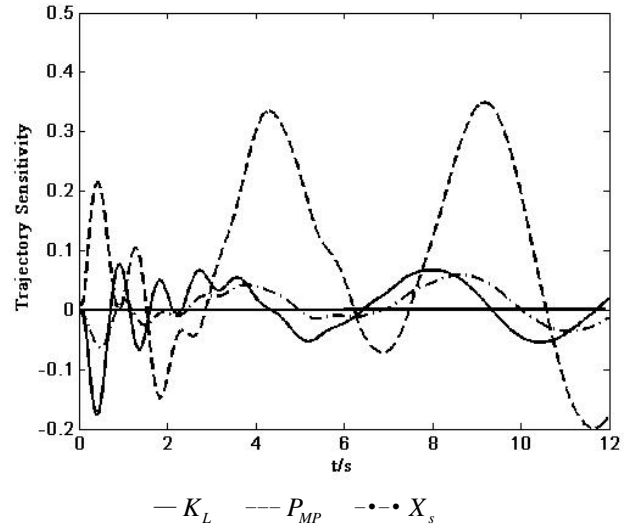


图 6 参数轨迹灵敏度曲线

综上可知，在不同的短路故障下，采用不同的观测变量， K_L 、 P_{MP} 和 X_s 都是唯一可辨识的，即短路故障的类型对于综合负荷参数的可辨识性是没有影响的。

3 不同观测变量的对比

利用 PSASP 软件仿真计算得到系统动态轨迹，即发电机相对功角、线路的有功功率、线路的无功功率和母线的电压，其灵敏度大小见表 1~表 4。

表 1 发电机 2#和 1#之间轨迹灵敏度/pu

	K_L	P_{MP}	X_s
单相短路	0.008067	0.026792	0.004954
两相间短路	0.02268	0.081693	0.013873
两相接地短路	0.021736	0.077746	0.013311
三相短路	0.038951	0.143965	0.024562

表 2 线路 4-5 之间有功功率轨迹灵敏度/pu

	K_L	P_{MP}	X_s
单相短路	0.003543	0.010621	0.001354
两相间短路	0.009999	0.028946	0.003559
两相接地短路	0.009522	0.027649	0.00338
三相短路	0.017426	0.046924	0.006908

表 3 线路 4-5 之间无功功率轨迹灵敏度/pu

	K_L	P_{MP}	X_s
单相短路	0.018574	0.064228	0.014412
两相间短路	0.046868	0.192632	0.039465
两相接地短路	0.044799	0.183344	0.037601
三相短路	0.077761	0.33669	0.067835

表 4 母线 4 轨迹灵敏度/pu

	K_L	P_{MP}	X_s
单相短路	0.002056	0.008143	0.001587
两相间短路	0.00518	0.025025	0.004327
两相接地短路	0.004968	0.023798	0.004126
三相短路	0.008494	0.043934	0.007409

由此可知：(1)综合负荷模型参数灵敏度的大小， $P_{MP} > K_L > X_s$ ；(2)不同的观测变量，其轨迹灵敏度大小的顺序为，发电机的相对功角、线路的有功功率、母线的电压，由于无功功率灵敏度在第一摆内很大，后面很小，并不利于辨识；同时在实际电网中，实测功角不易于获得，或者得到的实测功角误差很大，故选用线路的有功功率作为观察变量；(3)不同短路故障下，三相短路故障下综合负荷模型参数的轨迹灵敏度最大，单向短路故障下其轨迹灵敏度最小，两项间短路和两相接地短路故障下轨迹灵敏度大致相等，这和短路故障的类型是相一致的。

4 优化算法

本文采用粒子群优化算法，标准 PSO 中，粒子在搜索空间的速度和位置根据如下公式确定^[15]：
$$v_{id}(t+1) = \omega v_{id}(t) + c_1 r_1 (pbest - x_{id}(t)) + c_2 r_2 (gbest - x_{id}(t))$$
$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1)$$
(9)

式中， ω 为惯性权重； c_1, c_2 为加速度系数； r_1, r_2 是介于[0,1]之间均匀分布的随机数； v_{id} 为粒子*i*飞行速度矢量的第*d*维分量；*t*为当前的迭代次数； x_{id} 为粒子*i*位置矢量的第*d*维分量；*pbest*为粒子*i*位置矢量的第*d*维分量所经历的最好位置；*gbest*为粒子群在解空间中所经历的最好位置。

标准 PSO 算法流程如下：

- (1) 初始化粒子群，随机产生所有粒子的位置和速度并确定粒子的 *pbest* 和 *gbest*。
- (2) 对每个粒子，将它的当前位置与它经历过的最好位置 *pbest* 进行比较，如果当前位置更好，则将其作为当前的最好位置 *pbest*，否则 *pbest* 保持不变。
- (3) 对每个粒子，将它当前位置和群体中所有粒子所经历的最好位置 *gbest* 作比较，如果这个粒子的位置更好，则将其设置为当前的 *gbest*，否则 *gbest* 保持不变。
- (4) 更新粒子的速度和位置。

(5) 如未达到结束条件，返回步骤(2)。

(6) 开始新一轮迭代计算，否则取当前 *gbest* 为最优解。

5 算例

首先，在准确参数下，采用 PSASP 仿真程序计算获得系统的动态响应，将其作为实测值。采样区间为 12 秒，采样间隔为 0.02 秒。

以线路 4-5 之间的有功功率作为观测变量，采用粒子群优化算法，调用 PSASP，辨识综合负荷模型参数，不同短路故障下的参数辨识结果见表 5~表 8，仿真曲线对比图见图 7~图 10。

表 5 单相短路故障下负荷模型参数辨识结果

	K_L	P_{MP}	X_s
准确值	0.450	0.55	0.1800
辨识值	0.410	0.49	0.1880
误差/%	-8.89	-10.9	4.44

表 6 两相间短路故障下负荷模型参数辨识结果

	K_L	P_{MP}	X_s
准确值	0.450	0.55	0.180
辨识值	0.418	0.50	0.1900
误差/%	-7.11	-9.09	5.56

表 7 两相对地短路故障下负荷模型参数辨识结果

	K_L	P_{MP}	X_s
准确值	0.450	0.55	0.18
辨识值	0.418	0.50	0.1900
误差/%	-7.11	-9.09	5.56

表 8 三相短路故障下负荷模型参数辨识结果

	K_L	P_{MP}	X_s
准确值	0.450	0.55	0.1800
辨识值	0.422	0.51	0.1845
误差/%	-6.22	-7.27	2.5

由上可知：(1)通过图 7~图 10，可以看出仿真曲线和原始曲线吻合的很好，辨识精度较高；(2)通过表 5~表 8，可以看出三相短路故障下辨识精度最高，单相短路故障下辨识精度最低，两相间短路和两相对地短路辨识精度相差不大，和轨迹灵敏度的大小是相对应的；(3)在四种短路故障下， X_s 辨识精度最高，其次是 K_L ， P_{MP} 的辨识精度最低，这是和负荷本身的特性相关的。

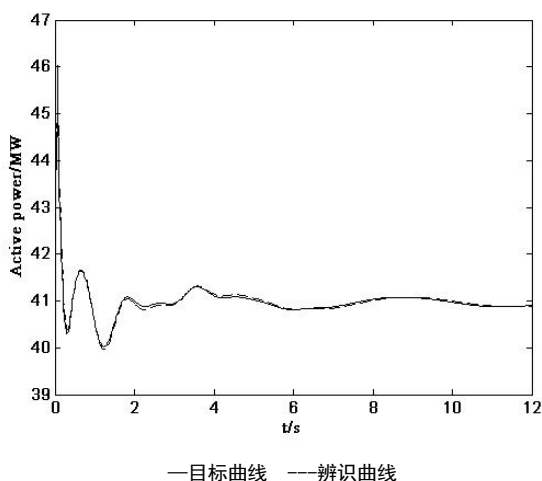


图7 单向短路故障下线路有功功率

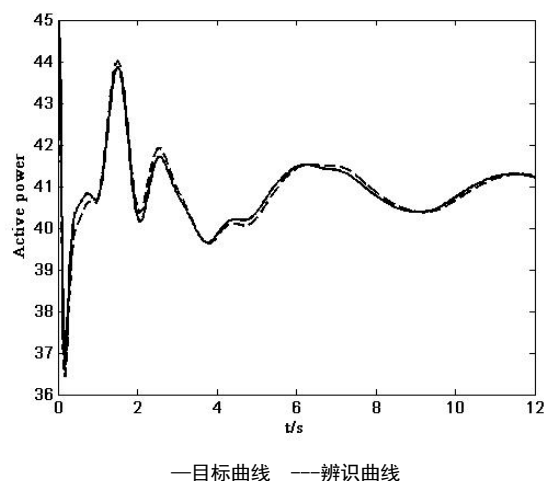


图10 两相对地短路故障下线路有功功率

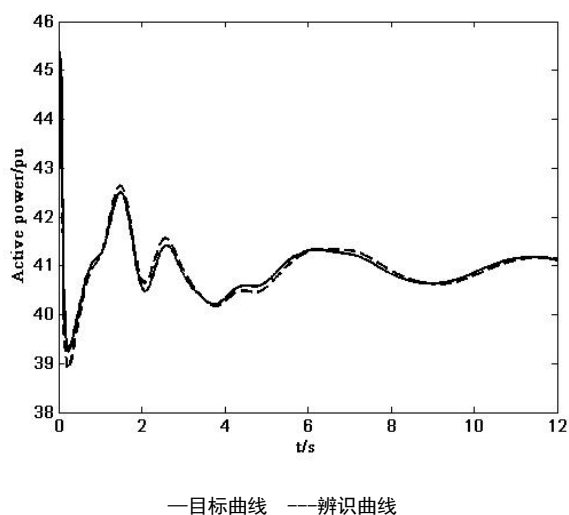


图8 两相间短路故障下线路有功功率

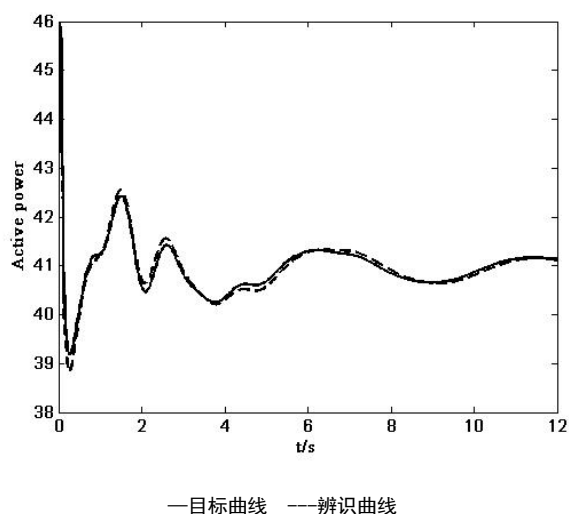


图9 两相对地短路故障下线路有功功率

6 结论

本文针对电力系统中综合负荷模型的参数辨识,得到如下结论:(1)采用不同的观测变量, K_L 、 P_{MP} 和 X_s 都是唯一可辨识的;(2)在不同的短路故障下, K_L 、 P_{MP} 和 X_s 都是唯一可辨识的,即短路故障的类型对于综合负荷参数的可辨识性是没有影响的;(3)采用粒子群优化算法,以有功功率作为观测变量,得到的辨识精度较高。

参考文献:

- [1] 沈善德. 电力系统辨识[M].北京:清华大学出版社, 1988.
- [2] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [4] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [5] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模(第二版)[M]. 北京: 水利电力出版社, 2008.
- [6] 曹一家, 李大虎. 基于广域测量系统的大区域电网负荷建模的研究[J]. 电力科学与技术学报, 2007, 22(2): 1-7.
- [7] 秦莹, 江全元, 曹一家, 等. 基于广域测量系统的电力负荷建模方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(7): 1199-1203.
- [8] 汤涌, 候俊贤, 刘文静. 电力系统数字仿真负荷模型中配电网络及无功补偿与感应电动机的模拟[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 8-12.
- [9] 陈谦, 孙建波, 蔡敏, 等. 考虑配电网络的综合负荷模型的参数确定[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 45-50.
- [10] 谢会玲, 鞠平, 罗建裕, 等. 基于灵敏度计算的电力系统参

- 数可辨识性研究[J].电力系统自动化, 2009, 33 (7): 17-21.
- [11] 贺仁睦,郑晓雨,马进,等.基于轨迹灵敏度的负荷参数辨识范围调整方法[J].电力系统自动化,2009, 33(13):17-21.
- [12] 汤涌, 张红斌, 侯俊贤, 等. 考虑配电网络的综合负荷模型[J]. 电网技术, 2007, 31(5): 34-38.
- [13] 马进, 王景钢, 贺仁睦. 电力系统动态仿真的灵敏度分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (17) : 20-27.
- [14] 孙元章, 杨新林.电力系统动态灵敏度计算的伴随方程

方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (3) : 6-12.

- [15] 李宁, 邹彤, 等. 基于粒子群的多目标优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(23): 43-46.

作者简介:

王 婷 (1986—), 女, 助理工程师, 从事继电保护相关工作;

郭 磊 (1985—), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统建模。