

基于 Matpower 的多智能体系统 功率变化下的灵敏度分析

李琪玥

(重庆移通学院)

摘要：针对电力系统的稳定性分析，本文从功率变化的角度出发，分析有功功率变化后，对电压、相位所带来的影响。首先分析多智能体系统，以及多智能体系统用于电力系统分析的优势，其次阐述 $P-\varphi$ 、 $P-U$ 两种不同的灵敏度分析过程，最后通过 Matpower 软件对分析过程进行仿真验证，从而直观地展示有功功率变化对于相位和电压产生的影响。

关键词：Matpower；多智能体系统；功率变化；灵敏度分析

2025.04.DQGY
40

0 引言

随着社会的进步、科技的发展，对电力系统稳定性的要求也越来越高。如若电力系统出现故障，造成大面积停电之类事故，将造成巨大的经济损失，同时也将影响社会的稳定发展。为保证电力系统处于稳定状态，往往需要进行大量的实验，但是其实验具有一定的危险性，此时仿真软件的运用凸显出了重要的意义。Matpower 软件运行稳定、计算速度快，常用于潮流计算、功率控制等方面。本文用 Matpower 进行灵敏度分析验证，探索电力系统中功率变化所带来的电压和相位的影响。与此同时，为了让分析过程更加智能化，融入多智能体系统这一概念，将电力系统和多智能体系统相互融合。

1 多智能体系统分析

多智能体系统 MAS (Multi Agent System) 由多

个智能体 (Agent) 组成，每个智能体可以实现自我控制、数据处理、优化等等，智能体之间还可以实现信息交流。

MAS 中的智能体，能够对系统中数据的变化做出快速的响应。每个智能体可以接收和发送数据。如果系统数据发生变化，相应的智能体将记录变化量，并且通过接口，与其他智能体实现数据通信，相互协同合作。与此同时智能体能够自主地判定，工作量由自身独立完成，或是与其他智能体相互合作、共同完成。智能体的具体特性可以体现在以下四个方面。

- 1) 智能性：智能体具有计算和分析能力，其能够分析、解决问题；
- 2) 自主性：智能体可以获取、优化数据；
- 3) 反应性：智能体可以根据变化的数据量做出相应的反应；
- 4) 互动性：智能体能够和其他智能体协同合作。

将多智能体系统用于电力系统分析时，可以让每个智能体控制一个子网或者节点（负载点），由此形成一个复杂的网络。由于智能体的自主性、互动性等特点，MAS 常用来分析电网中功率、电压、相位等数据。本文便使用 MAS 分析电网中有功功率、电压和相位之间的关系。

2 灵敏度分析

通过 MAS 进行电力系统分析时，往往用于潮流计算、功率控制等等，侧重子网或者节点的有功、无功功率等相关数据，对于功率改变所带来的电压、相位的变化，在研究时容易被忽略。但若系统中某个节点的负载发生变化，会影响系统中其他节点的电压和相位。灵敏度分析便阐述有功功率、无功功率、电压和相位这四者之间的关系。

本文重点研究有功功率对相位及电压的影响，即 $P-\varphi$ 灵敏度和 $P-U$ 灵敏度分析。如图 1 所示，以 5 节点系统为例，分析有功功率发生变化时，电压和相位的相关变化情况。即当节点 2 的有功功率以 ΔP_2 发生变化时，分析节点 4 的相位变化量 $\Delta\varphi_4$ 及电压变化量 ΔU_4 。

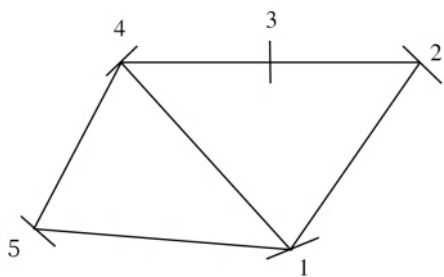


图 1 5 节点系统

2.1 功率变化下的 $P-\varphi$ 灵敏度分析

在分析节点 2 对节点 4 的影响时，首先需要通过牛顿迭代法计算相关的雅可比矩阵，从而得到对应的灵敏度矩阵。在计算过程中，考虑到雅可比矩阵的特殊性，将图 1 等效为图 2。此时分析对象的标号发生

变化，即基于图 2 进行 $P-\varphi$ 灵敏度分析时，将分析节点 1 有功功率的变化对节点 3 相位产生的影响。

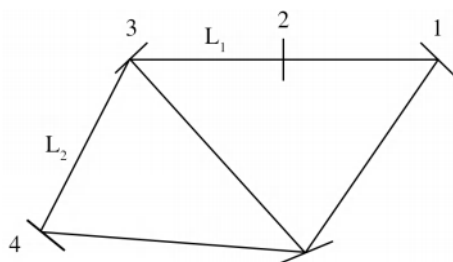


图 2 等效 5 节点系统

导线 L_1 和 L_2 汇聚于节点 3，故而节点 3 相位的变化量需要同时考虑 L_1 和 L_2 两条连接线所产生的影响，即：

$$\Delta\varphi_3 = \Delta\varphi_{31} + \Delta\varphi_{32} \quad (1)$$

其中， $\Delta\varphi_{31}$ （连接线 L_1 产生的影响）可以通过如下公式计算所得：

$$\Delta\varphi_{31} = -X_{33}\Delta P_{31} = -X_{33}(\rho_{31} \cdot \Delta P_1) \quad (2)$$

式中， ΔP_1 为节点 1 有功功率的变化量； ρ_{31} 为功率转移分布因子，可由公式计算所得：

$$\rho_{31} = \frac{1}{X_{32}}(X_{31} - X_{21}) \quad (3)$$

式中， X 为灵敏度矩阵。

式 (1) 中的 $\Delta\varphi_{32}$ （连接线 L_2 产生的影响）可用同样的方式计算所得，故而计算出节点 3 的相位变化量 $\Delta\varphi_{33}$ 。

2.2 功率变化下的 $P-U$ 灵敏度分析

在进行 $P-U$ 灵敏度分析时，和 $P-\varphi$ 灵敏度分析相似，因考虑到雅可比矩阵的特殊性，得到等效系统图（见图 2）。以下将分析节点 1 有功功率以 ΔP_1 发生改变时，节点 3 电压的变化情况。对于节点 3 而言，通过 L_1 、 L_2 分别连接节点 2 和节点 4，此时考虑节点 3 电压变化量，需要综合考虑 L_1 和 L_2 的反馈情况，即满足下列公式：

$$\Delta U_3 = \Delta U_{31} + \Delta U_{32} \quad (4)$$

其中 ΔU_{31} (连接线 L_1 产生的影响) 可由下列公式计算得出:

$$\Delta U_{31} = -Y_{33} \Delta P_{31} = -Y_{33} (\rho'_{31} \cdot \Delta P_1) \quad (5)$$

式 (5) 中的 ρ'_{31} 可通过式 (6) 计算得出结果:

$$\rho'_{31} = Y_{31} Y_{21} \cdot \frac{(X_{31} - X_{21})}{X_{32}} \quad (6)$$

式中, X 和 Y 均为灵敏度矩阵。式 (4) 中的 ΔU_{32} (连接线 L_2 产生的影响) 也可用式 (5)、式 (6) 计算得出, 故而最终得到节点 3 的电压变化量 ΔU_3 。

3 Matpower 仿真结果分析

基于上述分析, 在 Matpower 软件中构建图 1 所示的 5 节点网络, 对 $P-\varphi$ 灵敏度和 $P-U$ 灵敏度的分析进行验证。对于涉及的 5 个节点, 设定节点 1 为参考节点, 其余为负载点, 对应的负载情况如表 1 所示。网络中线路的阻抗为 $0.006+j \cdot 0.03\text{pu}$ 。

表 1 负载量

节点	负载/MW
2	$3.95+j2.31$
3	$2.95+j1.31$
4	$3.95+j2.31$
5	$2.95+j1.31$

当节点 2 有功功率的变化量 ΔP_2 为 1.7MW 时, 仿真之后可以得到节点 4 的电压变化量 ΔU_4 和相位变化量 $\Delta \varphi_4$, 如图 3 所示。

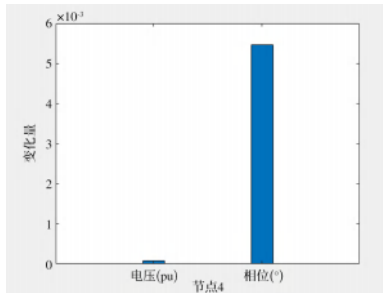


图 3 节点 4 电压、相位变化量

节点 4 受影响发生变化后, 原电压和相位加上计算所得 ΔU_4 、 $\Delta \varphi_4$, 可以得到两个计算数据量, 即新的电压量及相位量。与此同时, 节点 2 有功功率发生变化后, 5 节点网络中的每个节点的功率情况也需要通过潮流计算重新更新。更新后节点 4 可以得到电压、相位的理论值。即现下通过灵敏度分析和潮流计算可以得出两组电压、相位值。Matpower 软件仿真后, 可以得到如下数据。

表 2 电压值与相位值

	计算值 (根据灵敏度分析)	理论值 (根据潮流计算)
电压 (pu)	0.99903587	0.99897763
相位 (°)	-0.06761034	-0.06776370

对列表中的两组数据进行对比, 相位的误差远远高于电压误差, 为更加直观展示两个误差率, 可以通过图 4 所示的程序进行仿真。

```

77 % delta_PW
78 D_PW=D_PW1+D_PW2;
79 Va4_neu=Va4+D_PW;
80 Va4_N=result2.bus(4,9);
81 Va4_ab=abs(Va4_neu-Va4_N);
82
83 % delta_U
84 D_U=D_U1+D_U2;
85 U4_neu=U4+D_U;
86 U4_N=result2.bus(4,8);
87 U4_ab=abs(U4_neu-U4_N);
88
89 %% Bild
90 y=[U4_ab;Va4_ab];
91 bar(y,0.2);
92 set(gca,'XTickLabel',{'电压','相位'});
93 % set(gca,'YTickLabel',0.99:0.001:1.0);
94 xlabel('节点4');
95 ylabel('误差(%)');
    
```

图 4 误差率相关程序

图 4 所示程序中的第 77 至 81 行分别计算节点 4 的相位变化量、根据灵敏度分析所得的相位计算值、根据潮流计算所得的相位理论值和相位误差率; 第 83 行至 87 行分别计算节点 4 的电压变化量、根据灵

敏度分析所得的电压计算值、根据潮流计算所得的电压理论值和电压误差率；通过第 89 行至 95 行程序得到电压、相位误差率的展示图（见图 5）。

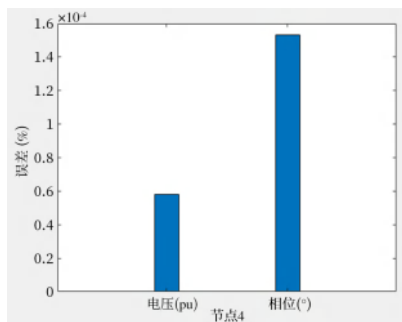


图 5 电压、相位误差率

不局限于节点 2 对节点 4 的影响，基于现有程序，可以快速分析节点 2 有功功率的变化对系统中所有节点电压、相位的影响。并且扩充到 5 节点系统，任何一个节点发生变化时，其他节点的变化量也可以仿真得出结果。同理，复杂的系统也可以基于此分析方式，掌握系统中功率和电压、相位之间的关系。

4 结束语

基于多智能体系统的 5 节点系统，在 Matpower 仿真过程中可以看出，节点有功功率的变化对其他节点电压和相位产生的影响不同，相位的变化量往往高于电压的变化量。与此同时，相位、电压的变化量所产生的新的相位、电压计算值和功率变化后通过潮流计算得出的相位、电压理论值之间，存在着误差。通

过仿真也可以看出，相位的误差率高于电压误差率。在本文的分析基础上，可以将现有 5 节点扩充至多节点、更加复杂得多智能体系统，分析电力系统中功率、电压和相位之间的关系。

参考文献

- [1] 曲娜, 韩磊, 王嘉旋. 基于 MATLAB 的电力系统潮流计算仿真 [J]. 沈阳大学学报 (自然科学版), 2022, 34 (6): 461-467.
- [2] 周伟昆. Matpower 仿真软件在电网电压调整中的应用 [J]. 电工技术, 2021 (19): 39-41.
- [3] M F Akorede, H Hizam. Teaching power system analysis courses using MATPOWER[J]. International Conference on IEEE, 2009: 45-51.
- [4] 黄开艺, 艾芊, 张宇帆, 等. 基于多智能体系统的多区域互联分布式潮流算法 [J]. 电力自动化设备, 2020, 40 (7): 174-217.
- [5] 殷自力, 陈宇星. 基于功率传输转移分布因子的简化电网潮流计算方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (17): 25-30.

(收稿日期: 2024-08-19)