

基于趋势理论的源—网—荷协调性控制

田 皓, 谭 浩

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要:针对电网不同运行方式下的源—网—荷协调性存在差异问题,提出基于趋势理论的源—网—荷协调性的辨识和控制方法。首先,利用方向导数证明电网的整体功角安全性指标与路径负载均衡度同趋;通过电网运行均衡度和路径负载均衡度之间的差异分析,引出电网可能存在源—网—荷不协调的观点;然后,基于电网的映射弹性网模型对局部电网进行物理分析,再通过数学工具对其进行奇异值分析,得出雅可比矩阵的最小奇异值和发电出力或负荷是同趋关系;最后,提出源—网—荷协调性的辨识和控制方法。采用 IEEE 9 节点系统验证整体功角安全性指标与路径负载均衡度同趋,而与电网运行均衡度无关;采用 IEEE 39 节点系统验证源—网—荷协调性控制方法的合理性。该研究通过跟踪大电网实时运行数据,提出在不同运行方式下的源—网—荷协调性的控制方法。

关 键 词:映射弹性势能;源—网—荷协调性;负载均衡性;同趋;最小奇异值

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.02.016 中图分类号:TM712 文章编号:1673-9140(2021)02-0132-10

Source-grid-load coordination analysis based on trend theory

TIAN Hao, TAN Hao

(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Considering the differences between the source-grid-load coordination in different operation modes of power grids, a source-grid-load coordination identification and control method are proposed in this paper based on trend theory. Firstly, the directional derivative is used to investigate the relationship between the overall power angle safety index and the load balance degree of the grid. According to the difference analysis between the equilibrium of power grid operation and the load balance degree of path, the imbalance between source-grid-load can be identified. Then, based on mapping elasticity potential energy model of power grids, the physical analysis of local grid can be performed. It is found that the minimum singular values of the Jacobian matrix and the output or load of power generation have the same trend. Finally, a source-grid-load coordination identification and control method are proposed. The IEEE 9-bus system is selected to verify the theoretical result that the overall power angle security index and the path load balance have the same trend and has no relationship with the balance of power grid operation. The IEEE 39-bus system is used to verify the effectiveness of the source-grid-load coordination control method.

Key words: mapping elasticity potential energy; source-grid-load coordination; load balance; same trend; minimum singular value

收稿日期:2018-06-06;修回日期:2018-09-06

基金项目:国家自然科学基金(52077009);湖南省教育厅重点项目(20A013)

通信作者:田 皓(1992-),男,硕士研究生,主要从事电力系统稳定分析与控制研究;E-mail:754181929@qq.com

随着智能电网的快速发展,间歇式新能源的接入比日渐增大^[1-4],使得机组出力、电网结构和负荷三者之间的协调性问题愈发突出,因此,国内外学者越来越重视对电网的源—网—荷协调性控制的研究^[5-8]。

目前,电价的制定、调峰方式、电网的运营模式和电力实时平衡调度被应用在源—网—荷协调性中^[9-12]。文献[9]对发电成本和输电成本进行分析,提出了电源、电网和负荷的协调方法,合理地将电网的成本分配给用户,对用电的价格制定具有很大的指导意义。通过机组出力、储能电站和柔性负荷进行协调配合,提出了源—网—荷协调调峰方式以实现电网的全局优化调峰^[10]。在对源—网—荷协调运营模式理解的基础上,文献[11]考虑电源方、电网公司和负荷这 3 种运营主体的切身利益后,利用算法获得了售电商的经济收益最优的方案。在考虑发电计划和实时负荷不平衡的情况后,文献[12]建立了电源层、电网和负荷层的调度模型,使得 3 种模型互相协调以实现电力实时平衡调度。上述文献都以成本为目标函数且对每条线路的有功功率进行约束来寻优,没有从电网的整体安全性角度去考虑输电路径的载流能力及其潮流分布情况。盲目地追求经济性而忽略安全性的电网会存在很大的安全隐患。

为了保证电网稳定运行,基于趋势理论该文对电网的源—网—荷协调性进行分析。首先,根据源—网—荷功率传输特性将电网分解成多个独立的简单系统,用映射弹性网模型赋给电网力学平衡的物理意义,探索整体功角安全性与输电路径负载均衡性之间的关系。然后,找出输电线路负载均衡性和输电路径负载均衡性之间的差异,引出电网可能存在源—网—荷不协调的论点。最后,考虑电源或负荷对源—网—荷协调性的影响将电网分成多个局部电网,该局部电网包含一台发电机带多个负荷或多台发电机带一个负荷的情况。基于物理分析以及对映射弹性势能的雅可比矩阵进行奇异值的分析找出电网源—网—荷的不协调性,并提出源—网—荷协调性的控制方法。该文通过控制源—网—荷的协调性,提高电网功角安全性和电网运行的稳定性。

1 映射弹性势能和路径负载均衡度之间的同趋性分析

1.1 路径负载均衡度的定义

若电网中含有 n 个电源和 m 个负荷,由源—网—荷功率传输特性可知:有功功率是由电压相位角高的节点流向低的节点,可将大电网分为 N 个独立的只含一个电源和一个负荷的系统,且每个独立系统中只有一条输电路径,即把电网分解成 N 个独立的简单系统。基于映射弹性网模型^[13],可用纵向映射的等效弹性网表示电网,如图 1 所示,电网中有 N 条输电路径,顶层和底层节点的电压相位差分别为 θ_{L1} 、 θ_{L2} 、 \dots 、 θ_{LN} ,其中, P_{Lj} 为第 j 条输电路径上传输的有功功率, X_{Lj} 为第 j 条输电路径的电抗。

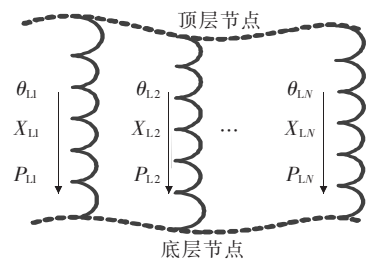


图 1 纵向映射的等效弹性网

Figure 1 The equivalent elastic network of longitudinal mapping

由于电网潮流随负荷的变化而变化,则输电路径也可能发生变化,故 N 不是一个固定值。利用统计学中的方差可以判断变量的均衡性,则定义衡量输电路径负载均衡性的指标为路径负载均衡度,即

$$D_L = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (T_{Lj} - T_{LA})^2 \quad (1)$$

其中,第 j 条路径的负载率 $T_{Lj} = 2P_{Lj}X_{Lj}$,平均负载率 $T_{LA} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_{Lj}$ 。

文献[14]定义了电网的映射弹性势能,即

$$E_\Sigma = \sum_{j=1}^N \frac{1}{2} P_{Lj} \theta_{Lj} \quad (2)$$

通过直流潮流法可得:

$$X_{Lj} = \frac{\theta_{Lj}}{P_{Lj}} \quad (3)$$

将式(3)代入 E_Σ 和 D_L , 可得:

$$D_L = \frac{4}{N} \sum_{j=1}^N \left(\theta_{Lj} - \frac{T_{LA}}{2} \right)^2 \quad (4)$$

$$E_\Sigma = \sum_{j=1}^N \frac{1}{2} \cdot \frac{\theta_{Lj}^2}{X_{Lj}} \quad (5)$$

由于每个负荷都随时间的变化而变化, 故形成负荷的波峰和波谷^[15]。在电网中, 当所有负荷一起变化时, 所有输电路径的有功功率 P_{Lj} 和功角 θ_{Lj} 也一起发生变化。

1.2 映射弹性势能和路径负载均衡度之间的同趋性分析

采用方向导数研究 2 个功角的多元特征函数的单调性。首先, 让 2 个特征函数分别对自变量求偏导, 可得:

$$\frac{\partial E_\Sigma}{\partial \theta_{Lj}} = \frac{\theta_{Lj}}{X_{Lj}} \quad (6)$$

$$\frac{\partial D_L}{\partial \theta_{Lj}} = \frac{8\theta_{Lj} - 4T_{LA}}{N} \quad (7)$$

在多维空间取任意方向 \mathbf{l} 的方向余弦 $\cos \alpha_1, \cos \alpha_2, \dots, \cos \alpha_{nm}$, 则 E_Σ 和 D_L 沿方向 \mathbf{l} 的方向导数分别为

$$\frac{\partial E_\Sigma}{\partial \mathbf{l}} = [\cos \alpha_1, \cos \alpha_2, \dots, \cos \alpha_N] \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \theta_{L1} & \theta_{L2} & \dots & \theta_{LN} \\ X_{L1} & X_{L2} & \dots & X_{LN} \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$$\frac{\partial D_L}{\partial \mathbf{l}} = \frac{1}{N} [\cos \alpha_1, \cos \alpha_2, \dots, \cos \alpha_N] \cdot$$

$$[8\theta_{L1} - 4T_{LA}, 8\theta_{L2} - 4T_{LA}, \dots, 8\theta_{LN} - 4T_{LA}]^T \quad (9)$$

其中

$$\cos \alpha_j = \frac{\Delta \theta_{Lj}}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (\Delta \theta_{Lj})^2}}, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

式(10)为方向 \mathbf{l} 的方向余弦。将式(10)代入式(8)、(9), 可得:

$$\frac{\partial E_\Sigma}{\partial \mathbf{l}} = \sum_{j=1}^N \frac{(\Delta \theta_{Lj}) \theta_{Lj}}{X_{Lj} \sqrt{\sum_{j=1}^N (\Delta \theta_{Lj})^2}} \quad (11)$$

$$\frac{\partial D_L}{\partial \mathbf{l}} = \sum_{j=1}^N \frac{\Delta \theta_{Lj} (8\theta_{Lj} - 4T_{LA})}{N \sqrt{\sum_{j=1}^N (\Delta \theta_{Lj})^2}} \quad (12)$$

令 $a_j = 1/X_{Lj}$ 、 $b_j = 1 - (T_{LA}/2\theta_{Lj})$, a_j 、 b_j

分别为方向向量 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 中的元素。在多维空间分别取任意方向 \mathbf{al} 、 \mathbf{bl} 的方向余弦 $\cos \beta_1, \cos \beta_2, \dots, \cos \beta_N$ 、 $\cos \gamma_1, \cos \gamma_2, \dots, \cos \gamma_N$, 分析 E_Σ 的函数 f 在点 P 处沿不同方向 (\mathbf{l} 、 \mathbf{al}) 上方向导数的数值是否同号, 如图 2 所示。

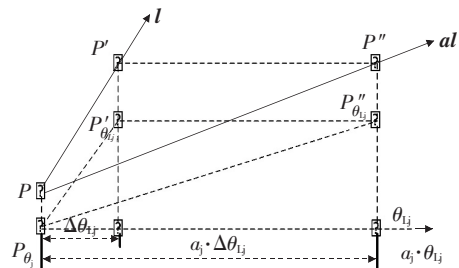


图 2 函数 f 沿不同方向上的变化趋势

Figure 2 The changing trend of function f along different directions

E_Σ 在方向 \mathbf{l} 、 \mathbf{al} 上的表达式分别为

$$\left\{ \begin{aligned} E_\Sigma &= f(\theta_{L1}, \theta_{L2}, \dots, \theta_{LN}) = \sum_{j=1}^N \frac{1}{2} \cdot \frac{\theta_{Lj}^2}{X_{Lj}} \\ E_\Sigma &= f(a_1 \theta_{L1}, a_2 \theta_{L2}, \dots, a_N \theta_{LN}) = \end{aligned} \right. \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{aligned} & \sum_{j=1}^N \frac{1}{2a_j^2} \frac{(a_j \theta_{Lj})^2}{X_{Lj}} \end{aligned} \right.$$

由方向导数的定义^[16]和式(13)可得:

$$\frac{\partial E_\Sigma}{\partial \mathbf{al}} = \frac{|pp''|}{|pp'|} \frac{\partial E_\Sigma}{\partial \mathbf{l}} = c \frac{\partial E_\Sigma}{\partial \mathbf{l}} \quad (14)$$

其中, c 为大于零的常数。

同理可得:

$$\frac{\partial D_L}{\partial \mathbf{bl}} = d \frac{\partial D_L}{\partial \mathbf{l}} \quad (15)$$

其中, d 为大于零的常数。

采用方向余弦求方向导数, 即

$$\frac{\partial E_\Sigma}{\partial \mathbf{al}} = \sum_{j=1}^N \frac{(\Delta \theta_{Lj}) \theta_{Lj}}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (a_j \Delta \theta_{Lj})^2}} \quad (16)$$

$$\frac{\partial D_L}{\partial \mathbf{bl}} = \frac{8}{N} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{(\Delta \theta_{Lj}) \theta_{Lj}}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (b_j \Delta \theta_{Lj})^2}} \quad (17)$$

由式(16)、(17)可得:

$$\frac{\partial E_\Sigma}{\partial \mathbf{al}} = N \cdot \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^N (b_j \Delta \theta_{Lj})^2}}{8 \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^N (a_j \Delta \theta_{Lj})^2}} \cdot \frac{\partial D_L}{\partial \mathbf{bl}} \quad (18)$$

由式(14)、(15)、(18)可得:

$$\frac{\partial E_{\Sigma}}{\partial \mathbf{l}} = N \cdot \frac{d \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^N (b_j \Delta \theta_{Lj})^2}}{8c \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^N (a_j \Delta \theta_{Lj})^2}} \cdot \frac{\partial D_L}{\partial \mathbf{l}} \quad (19)$$

根据式(19),且因 $(d/c) > 0$,则 E_{Σ} 和 D_L 在任意方向 \mathbf{l} 上的方向导数的数值同号,即 E_{Σ} 和 D_L 在任意方向 \mathbf{l} 上变化率同号。可以证明:在电网发生潮流变化的情况下,电网的映射弹性势能 E_{Σ} 和路径负载均衡度 D_L 同趋。故映射弹性势能既是衡量电网整体功角安全性的指标,又是衡量电网输电电路路径负载均衡性的指标。

2 路径和线路的负载均衡性差异分析

假设电网中有 n 条线路,交流线路 j 两端节点电压 \dot{U}_{j1} 、 \dot{U}_{j2} 的相位差为 θ_j ,有功功率为 P_j ,电抗为 X_j ,忽略电阻。如图 3 所示。

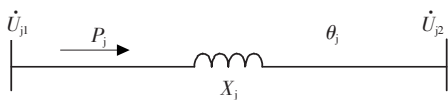


图 3 交流线路简化模型

Figure 3 simplified model of AC line

文献[17]将衡量输电线路负载均衡性的指标定义为电网运行均衡度,即

$$D = \sum_{j=1}^n (T_j - T_A)^2 \quad (20)$$

将式(20)缩小成类似于式(1)的形式,即

$$D' = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (T_j - T_A)^2 \quad (21)$$

其中,第 j 条线路的负载率 $T_j = 2P_j X_j$;平均负载

率 $T_A = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n T_j$ 。

第 j 条线路上传输的有功功率 P_j 与输电电路路径上传输的有功功率之间的关系为

$$\begin{cases} P_j = (m1) P_{L1} + (m2) P_{L2} + \dots + (mN) P_{LN} \\ \{m_x = \begin{cases} 1, & \text{第 } x \text{ 条输电电路路径中有第 } j \text{ 条线路,} \\ 0, & \text{第 } x \text{ 条输电电路路径中没有第 } j \text{ 条线路,} \end{cases} \\ x = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (22)$$

从式(22)中可得:第 j 条支路上传输的有功功率至少受到一个输电电路路径上有功功率的影响,而且每条线路的有功功率受到输电电路有功功率的影响各不相同,故电网中所有线路上传输的有功功率(在这里把一条线路上的有功功率当成一个变量)之间不是相互独立的。

E_{Σ} 和 D_L 同趋,再比较 D_L 和 D' 。因 D' 中变量不是相互独立的,故路径负载均衡度 D_L 和衡量线路负载均衡性的电网运行均衡度 D 存在差异。该差异可以解释为在综合优化模型中,当电网整体功角安全性最好时,线路 2-3 传输的有功功率超过了传输极限^[17]。同时,该差异的存在可能是源—网—荷不协调的表现。

3 基于奇异值分析的源—网—荷协调性控制方法

3.1 电网节点在弹性力学网络中的受力分析

按照有功功率的传输方向,即电压相位角高的节点流向低的节点。当单独分析顶层或底层节点 k 时,将图 1 分解成多个局部电网,一个顶层节点的注入功率通过传输路径到达 x ($x \geq 1$) 个底层节点的负荷,即一台发电机带 x 个负荷;一个负荷由 y ($y \geq 1$) 台发电机共同提供。

首先,用弹性力学网络分析电网的顶层节点,如图 4 所示,可知当该局部电网的源—网—荷协调性很好,即输电电路路径上的有功功率与机组出力同趋时,顶层节点上的受力越大即发电机的注入功率 $P_{\text{top}k}$ 越大,则在输电电路路径上传输的有功功率 $P_{\text{bot}j}$ ($j = 1, 2, \dots, x$) 也越大;继而每根弹簧被拉伸的越长即输电电路路径两端的电压相位差 θ_{Lj} ($j = 1, 2, \dots, x$) 越大,该局部电网的总映射弹性势能 $E_{L\Sigma}$ 越大,则该局部电网的路径负载均衡度越大。同时,该顶层节点的相位角 $\theta_{\text{top}k}$ 越大。图中虚线标出了平衡节点的相位角 θ_{ph} 为零的位置,将这个位置设为映射弹性势能的参考点。故将 $E_{L\Sigma}$ 可以分为顶层节点到参考点的映射弹性势能 $E_{\text{top}k}$ 与参考点到底层节点的映射弹性势能 $E_{\text{bot}k}$ 之和。因 $E_{\text{top}k}$ 和 $E_{\text{bot}k}$ 都是每条弹簧被分成 2 份之后映射

成为弹性势能的,故这2个变量同趋,也可以说 $E_{\text{bot}k}$ 与 $E_{L\Sigma}$ 同趋,即

$$E_{L\Sigma} \sim E_{\text{top}k} = \frac{1}{2} P_{\text{top}k} (\theta_{\text{top}k} - \theta_{\text{ph}}) = \frac{1}{2} P_{\text{top}k} \theta_{\text{top}k} \quad (23)$$

然后,用上述相同的方法分析电网的底层节点,如图5所示,可知 $E_{\text{bot}k}$ 可以反映该局部电网的总映射弹性势能 $E_{L\Sigma}$ 的大小,即

$$E_{L\Sigma} \sim E_{\text{bot}k} = \frac{1}{2} P_{\text{bot}k} (\theta_{\text{ph}} - \theta_{\text{bot}k}) = \frac{1}{2} (-P_{\text{bot}k}) \theta_{\text{bot}k} \quad (24)$$

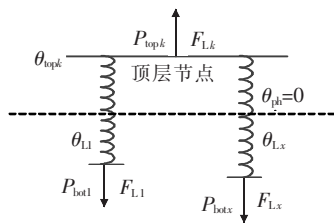


图4 顶层节点的受力分析

Figure 4 Force analysis of top node

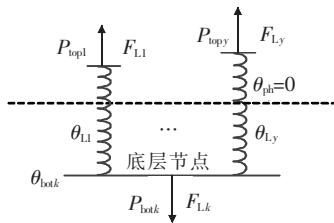


图5 底层节点的受力分析

Figure 5 Force analysis of bottom node

综上所述,当单独分析顶层或底层节点 k 时,该节点对电网造成的局部影响可以由局部电网的总映射弹性势能 $E_{L\Sigma}$ 的大小来判别; $E_{L\Sigma}$ 越大说明该局部电网的整体功角安全性越差。节点 k 和参考点之间的映射弹性势能 E_k 和 $E_{L\Sigma}$ 同趋,则只需分析 E_k 的大小就能说明其节点对整体功角安全性的影响,即

$$E_k = \frac{1}{2} P_k \theta_k \quad (25)$$

式中 P_k 、 θ_k 分别为电网顶层和底层节点的注入有功功率和相位角。

在实际调度中,调度员通常是通过调整发电计划来满足用电需求。在保证电网整体功角安全性的前提下,通过更改发电计划,让电网的源—网—荷协调性朝着好的方向发展。

3.2 系统模型

由直流潮流法可得节点的电压相位角:

$$\boldsymbol{\theta} = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{P} \quad (26)$$

式中 \mathbf{P} 、 $\boldsymbol{\theta}$ 分别为电网所有节点的注入功率和电压相位角列矩阵; \mathbf{B}^{-1} 为电纳矩阵的逆矩阵。

θ_k 可以写成线性加权函数,即

$$\theta_k =$$

$$a_{k1} P_1 + \cdots + a_{kk} P_k + \cdots + a_{k(n+m)} P_{(n+m)} \quad (27)$$

其中, a_{k1} 、 a_{k2} 、 \cdots 、 a_{kk} 、 \cdots 、 $a_{k(n+m)}$ 为加权系数。

将式(27)代入式(25)可得:

$$E_k = \frac{1}{2} P_k (a_{k1} P_1 + \cdots + a_{kk} P_k + \cdots + a_{k(n+m)} P_{(n+m)}) \quad (28)$$

由式(25)可得到修正方程为

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \mathbf{J}_{\text{EP}} \Delta \mathbf{P} \quad (29)$$

式中 ΔE_k 为节点 k 和参考节点之间的映射弹性势能的变化量; $\Delta \mathbf{P}$ 为所有节点 k 注入有功功率变化量的列向量; \mathbf{J}_{EP} 中的元素为节点 k 的 E_k 对所有节点 k 的注入有功功率的偏导数, $\mathbf{J}_{\text{EP}} \in \mathbf{R}^{1 \times (n+m)}$ 。对雅可比矩阵 \mathbf{J}_{EP} 进行奇异值分解,可得:

$$\mathbf{J}_{\text{EP}} = \mathbf{V} \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{U}^T = \sum_{i=1}^{n+m} \delta_i \mathbf{v}_i \mathbf{u}_i^T \quad (30)$$

式中 $n+m$ 为雅可比矩阵 \mathbf{J}_{EP} 的列数; \mathbf{V} 、 \mathbf{U} 分别为 $1 \times (n+m)$ 和 $(n+m) \times (n+m)$ 阶的正交矩阵; $\boldsymbol{\Lambda}$ 为由奇异值 δ_i 组成的对角矩阵; 奇异向量 \mathbf{v}_i 和 \mathbf{u}_i 分别为 \mathbf{V} 和 \mathbf{U} 中 δ_i 所对应的列向量。

令 δ_{\min} 为最小奇异值,当 $\delta_{\min} \neq 0$ 时,有

$$\Delta \mathbf{P} = \mathbf{U} \boldsymbol{\Lambda}^{-1} \mathbf{V}^T \Delta \mathbf{E}_k = \sum \delta_i^{-1} \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T \Delta E_k \quad (31)$$

可知当一个奇异值几乎为零时,任何小的扰动将会造成状态变量的巨大变化。 ΔE_k 为扰动,每个节点 k 注入有功功率的变化量为状态变量。

由弹性力学网络的节点受力分析可得: E_k 越小,节点 k 的有功功率越小。当节点的 E_k 越小时,对其节点 k 的 E_k 增加一个扰动 ΔE_k ,节点的有功功率 P (注入功率 $P_{\text{top}k}$ 和负荷 $P_{\text{bot}k}$) 变化量越大; 即节点 k 的有功功率越小时,节点有功功率变化量越大。雅可比矩阵 \mathbf{J}_{EP} 的最小奇异值 δ_{\min} 的大小表明了节点的有功功率的相对临近程度,即 δ_{\min} 越小则节点的有功功率变化量越大。

综合可得:最小奇异值 δ_{\min} 越小,节点 k 的有功功率 P 也越小,故 δ_{\min} 、 P 同趋。故提出源—网—荷协调性的控制方法,即改变节点的有功功率 P ,使其与该节点下的最小奇异值 δ_{\min} 同趋。

4 算例分析

4.1 路径负载均衡度和电网运行均衡度之间差异性的合理性分析

该文采用 IEEE 9 节点系统作为算例,系统共有 9 个节点、9 条线路、3 台发电机,其中,①为平衡节点,⑤⑥⑧为负荷节点,基准电压为 220 kV,如图 6 所示。

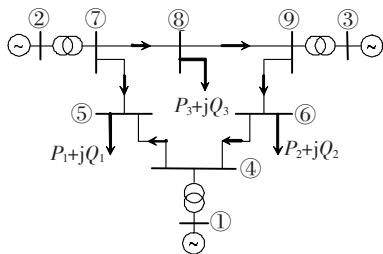


图 6 新英格兰 3 机 9 节点系统

Figure 6 New England 3-generator 9-bus system

运行方式:系统日负荷(每个小时均匀取 10 个时刻点,共 240 个时刻点)曲线如图 7 所示,其中 3 条负荷曲线(实线)、1 条总负荷曲线(虚线),并按传统经济优化模型获取机组发电计划^[18],仿真得到运行潮流数据。

通过上述运行方式,可以得到映射弹性势能和路径负载均衡度随时间的变化曲线,如图 8 所示,可知两者之间的变化趋势大致相同。为了更加精确地弄清映射弹性势能和路径负载均衡度间的关系,利用 SPSS 统计软件,对两者在 240 个时刻点得到的 240 组数据进行分析,得到的离散示意图 9 所示,可以明显地看出,映射弹性势能和路径负载均衡度同增同减,故这 2 个状态量同趋。映射弹性势能和电网运行均衡度之间的关系如图 10 所示,可知映射弹性势能和电网运行均衡度两者的变化趋势不相同,故这 2 个状态量不同趋。

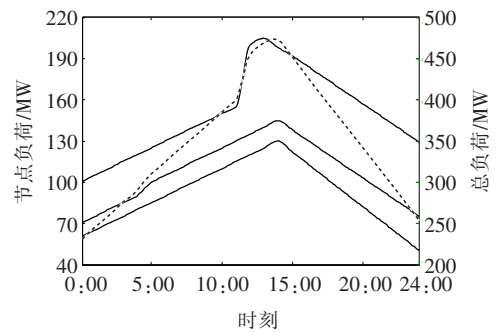


图 7 9 节点系统有功负荷曲线

Figure 7 Active load curve of 9-bus system

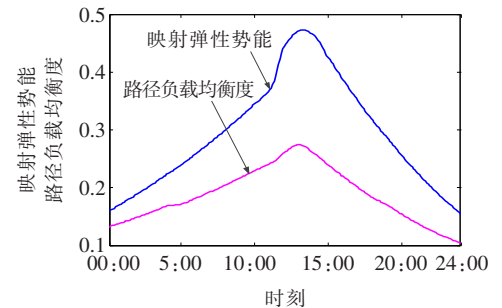


图 8 映射弹性势能和路径负载均衡度随时间的变化曲线

Figure 8 The mapping elastic potential energy and grid equilibrium degree curves varying with time

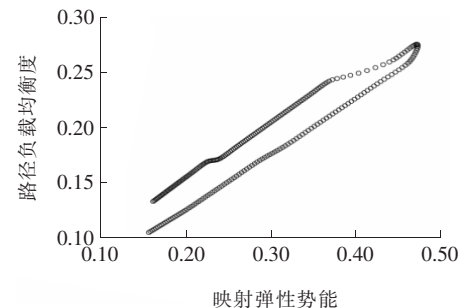


图 9 映射弹性势能和路径负载均衡度间的离散

Figure 9 The discrete graph between the mapping elastic potential energy and path load balance degree

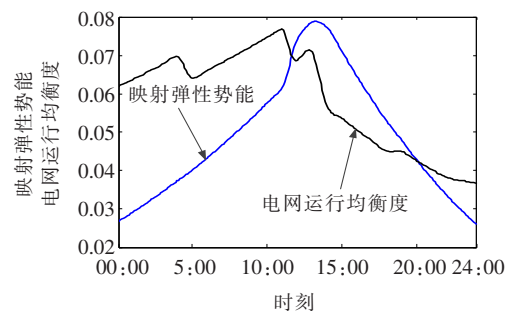


图 10 映射弹性势能和电网运行均衡度随时间变化的曲线

Figure 10 The mapping elastic potential energy and grid equilibrium degree curves varying with time

综上所述,电网的整体功角安全性指标只和输电电路径上的载荷能力有关,与输电线路无关。同时,IEEE 9 节点系统的电网运行均衡度和路径负载均衡度不同趋,说明该电网的源—网—荷协调性不好。

4.2 源—网—荷协调性控制方法的合理性分析

该文采用 IEEE 39 节点系统作为算例,系统中共有 39 个节点、46 条线路、10 台发电机,其中,31 为平衡节点,19 个负荷节点,基准电压为 345 kV,如图 11 所示。系统日负荷曲线如图 12 所示,其中有 19 条负荷曲线(实线)、1 条总负荷曲线(虚线)。

为了分析源—网—荷的协调性,可对顶层节点进行奇异值分析,得出同一个数量级上节点的最小奇异值和有功功率的变化曲线。以节点 32 为例,如图 13 所示,可知最小奇异值和有功功率之间的变化趋势大致相同。为了更精确地弄清两者间的关系,利用 SPSS 统计软件对两者在 240 个时刻点得到的 240 组数据进行相关性分析,得出的离散示意图如图 14 所示。节点 32 的最小奇异值和有功功率与时间的相关性结果如表 1 所示。

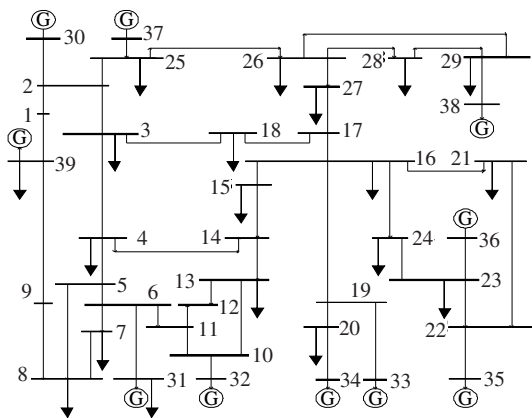


图 11 新英格兰 10 机 39 节点系统

Figure 11 New England 10-generator 39-bus system

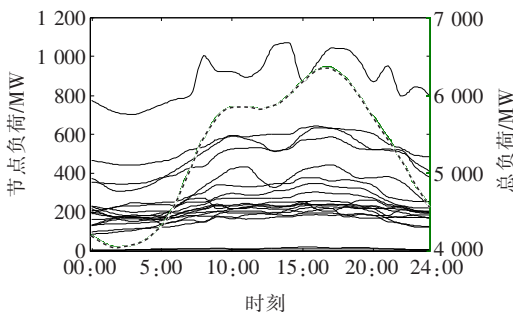


图 12 39 节点系统有功负荷曲线

Figure 12 Active load curve of 39-bus system

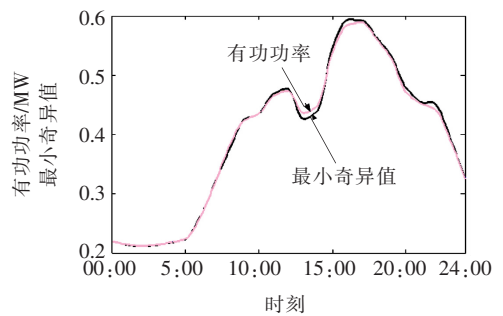


图 13 节点 32 的最小奇异值和有功功率的变化曲线

Figure 13 The variation curve of the minimum singular value and the active power of node 32

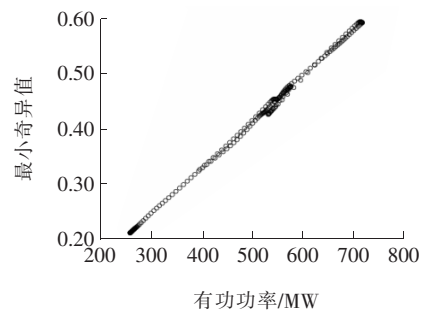


图 14 节点 32 的最小奇异值和有功功率之间的离散示意

Figure 14 The discrete graph between the minimum singular value and the active power of node 32

表 1 节点 32 的最小奇异值、有功功率与时间的相关性

Table 1 The correlation coefficient between the minimum singular value and the active power of node 32 and time

衡量指标	最小奇异值	有功功率
Pearson 相关性	1	1

由表 1 可知,节点 32 的最小奇异值和有功功率的相关系数为 1,故这 2 个状态量线性相关,即两者同趋,说明该节点所在局部电网的源—网—荷协调性很好。

利用 SPSS 统计软件可以得出顶层节点的最小奇异值和有功功率之间的相关系数,如表 2 所示,可知从改变发电计划的角度出发,改变顶层节点中相关系数最小的节点 37 的发电机出力曲线,可以得出同一个数量级上节点 37 的最小奇异值和有功功率之间的关系,如图 15 所示。

由图 15 可知,在 08:00—09:00、12:00—16:00 和 18:00—20:00 这 3 个时间段中,节点 37 的最小奇异值和有功功率不同趋,故只需改变这 3 个时间段的发电机出力曲线,使节点 37 的有功功率、最小奇异值同趋即可。

改变节点 37 的发电出力后的最小奇异值和有功功率的变化曲线如图 16 所示;同时,验证该节点发电出力的改变是否影响其他节点的同趋性,即验证电网分为多个独立的局部电网是否合理。以节点 32 为例,改变节点 37 发电出力后节点 32 最小奇异值和有功功率的变化曲线如图 17 所示。

对比图 15、16 可知,改变后的节点 37 发电出力整体降低,故发电成本亦减少。基于局部电网的映射弹性网模型可知,发电出力的减少必然伴随着弹簧拉伸长度的缩短,即局部电网的功角安全性变好。由图 16、17 可知,图中 2 条曲线的变化趋势基本一致。利用 SPSS 统计软件,在改变节点 37 发电出力后,对节点 32、37 的最小奇异值和有功功率进行相关性分析,相关性结果如表 3 所示。对比节点 37 发电出力前、后的映射弹性势能标么值的变化曲线,如图 18 所示。

由表 2、3 可知,在改变节点 37 发电出力的前、后,只有节点 37 中最小奇异值和有功功率的变化趋势发生了变化,故通过调整机组出力,只会影响该顶层节点在局部电网的源—网—荷的协调性,即对其他顶层节点没有影响。同时,验证了局部电网都是独立的。

表 2 顶层节点的最小奇异值和有功功率的相关系数

Table 2 The correlation coefficient between the minimum singular value and the active power of the top node

节点	相关系数	节点	相关系数
30	0.981	36	0.983
32	1.000	37	0.943
33	0.999	38	0.996
34	0.994	39	0.955
35	0.998		

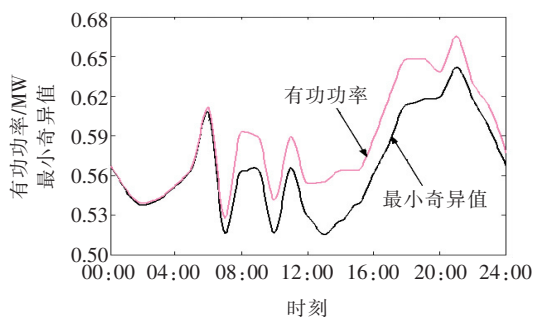


图 15 节点 37 的最小奇异值和有功功率的变化曲线

Figure 15 The variation curve of the minimum singular value and the active power of node 37

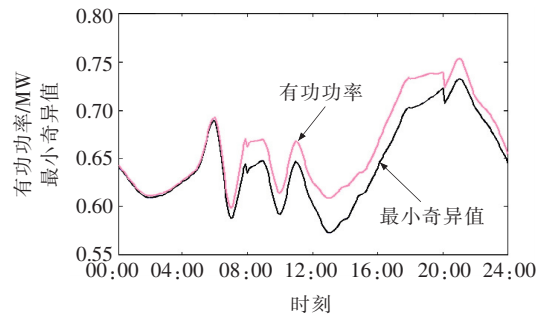


图 16 改变节点 37 发电出力后最小奇异值和有功功率的变化曲线

Figure 16 The change curve of minimum singular value and active power after node 37 generating output is changed

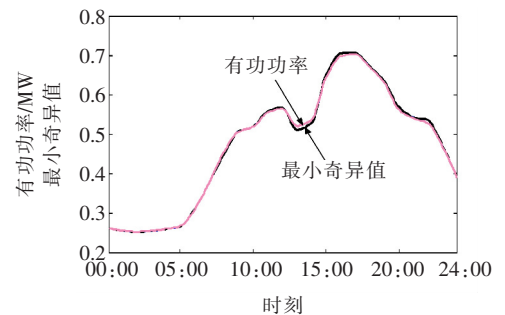


图 17 改变节点 37 发电出力后节点 32 最小奇异值和有功功率的变化曲线

Figure 17 The change curve of minimum singular value and active power after node 32 generating output is changed

表 3 节点 32 和 37 的最小奇异值和有功功率的相关系数
Table 3 The correlation coefficient between the minimum singular value and the active power of nodes 32 and 37

节点	相关系数	节点	相关系数
32	1.000	37	0.969

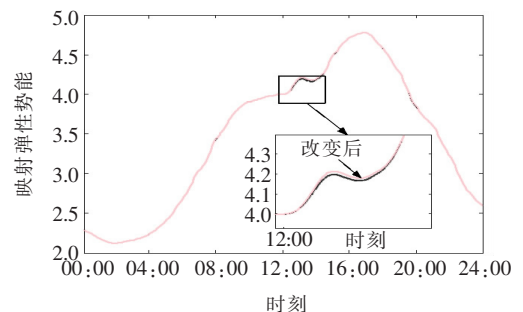


图 18 改变节点 37 发电出力前、后映射弹性势能的变化曲线

Figure 18 Changing the curve of elastic potential energy values before and after power generation of node 37

由图 18 可知,改变节点 37 发电出力前、后对电网整体功角安全性指标几乎没变化,故适当改变顶层节点的发电出力可以保证在整体功角安全性几乎不发生变化,且提高了电网发电的经济性。该文提出的控制源—网—荷协调性的方法不仅保证安全性,而且减少了发电成本,提高了经济性,适用于大电网的安全性和经济性调度。

5 结语

通过趋势理论研究了映射弹性势能这个功角安全性指标和路径负载均衡度之间的关系。同时,对输电路径负载均衡性和输电线路负载均衡性进行了差异分析,从而引出电网可能存在源—网—荷不协调的观点。最后,从物理学的角度出发,对局部电网进行弹性力学分析;从数学的角度出发,利用雅可比矩阵进行奇异值分析,得到源—网—荷协调性的辨识和控制方法。研究发现:

1)可以把电网分解成多个独立的局部电网,该局部电网为一个发电机带多个负荷或多个发电机给一个负荷供电的模型;

2)映射弹性势能是对其输电路径上功角稳定程度的反应,与线路功角稳定无关;

3)若顶层或底层节点的最小奇异值和有功功率同趋,则该局部电网的源—网—荷协调性很好;

4)当节点的最小奇异值下降时,减小发电出力既降低发电成本,也提高了该局部电网的源—网—荷协调性。

通过改变发电机组的出力,把每个局部电网的源—网—荷协调性都调节好,最终可使电网的整体源—网—荷的协调性变好,即电源发出的有功功率能流畅地经过输电线路到达负荷,提高了电网运行的稳定性。

参考文献:

[1] 陈锴,钟浩,李世春,等.考虑输电断面限制的风—光—梯级水电站长期优化调度[J].智慧电力,2020,48(5):27-33.
CHEN Kai,ZHONG Hao,LI Shichun,et al. Long-term optimal scheduling of wind-photovoltaic-cascade hydro-power stations considering transmission section con-

straints[J]. Smart Power,2020,48(5):27-33.

- [2] 宋杰,张卫国,李树鹏,等.蓄热式电采暖负荷参与风电消纳运行策略研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(3):80-87.
SONG Jie,ZHANG Weiguo,LI Shupeng,et al. Research on operational strategy for regenerative electric heating load participating in wind power consumption[J]. Power System Protection and Control,2021,49(3):80-87.
- [3] 黄景光,陈波,林湘宁,等.基于乌鸦搜索算法的孤岛微网多目标优化调度[J].高压电器,2020,56(1):162-168.
HUANG Jingguang,CHEN Bo,LIN Xiangning,et al. Multi-objective optimal operation of islanded microgrid based on crow search algorithm[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(1):162-168.
- [4] 王蓓蓓,刘小聪,李扬.面向大容量风电接入考虑用户侧互动的系统日前调度和运行模拟研究[J].中国电机工程学报,2013,33(22):35-44.
WANG Beibei,LIU Xiaocong,LI Yang. Day-ahead generation scheduling and operation simulation considering demand response in large-capacity wind power integrated systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(22):35-44.
- [5] 孙建梅,李龙龙.低碳电网建设研究现状及未来发展趋势[J].电网与清洁能源,2019,35(3):21-30+36.
SUN Jianmei,LI Longlong. Research status and development trend of low-carbon grid construction[J]. Power System and Clean Energy,2019,35(3):21-30+36.
- [6] 张东霞,姚良忠,马文媛.中外智能电网发展战略[J].中国电机工程学报,2013,33(31):1-14.
ZHANG Dongxia,YAO Liangzhong,MA Wenyuan. Development strategies of smart grid in China and Abroad[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31):1-14.
- [7] Li W Y. Framework of probabilistic power system planning[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015,1(1):1-8.
- [8] 张宁,代红才,胡兆光,等.考虑系统灵活性约束与需求响应的源网荷协调规划模型[J].中国电力,2019,52(2):61-69.
ZHANG Ning,DAI Hongcai,HU Zhaoguang,et al. A source-grid-load coordinated planning model considering system flexibility constraints and demand response[J]. Electric Power,2019,52(2):61-69.

- [9] 何凯,王剑晓,王佳伟,等. 基于全成本电价的电网规划方案评估与优选[J]. 中国电力,2020,53(3):66-75.
HE Kai,WANG Jianxiao,WANG Jiawei,et al. Evaluation and optimization of power network planning scheme based on total-cost price[J]. Electric Power,2020,53(3):66-75.
- [10] 孙勇,魏敏,王磊,等. 基于系统调峰约束的电网风电消纳水平研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(19):107-112.
SUN Yong,WEI Min,WANG Lei,et al. Study on wind power consumption based on system peak regulation capability constrain[J]. Power System Protection and Control,2019,47(19):107-112.
- [11] 张永明,郭晨雨,何英静,等. 开放售电市场环境考虑 DG 和 ILR 的配电网双层规划[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(3):107-113.
ZHANG Yongming,GUO Chenyu,HE Yingjing,et al. Distribution network planning considering DG and ILR under the environment of power sales side liberalization[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(3):107-113.
- [12] 朱建全,段翩,刘明波. 计及风险与源—网—荷双层协调的电力实时平衡调度[J]. 中国电机工程学报,2015,35(13):3239-3247.
ZHU Jianquan,DUAN Pian,LIU Mingbo. Electric real-time balance dispatch via bi-level coordination of source-grid-load of power system with risk[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(13):3239-3247.
- [13] 竺炜,周孝信,唐如. 电网的弹性力学网络拓扑映射[J]. 中国电机工程学报,2011,31(31):109-117.
ZHU Wei,ZHOU Xiaoxin,TANG Ru. Topological mapping of elastic network for power grids[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(31):109-117.
- [14] 竺炜,周孝信,蒋岷,等. 基于映射弹性势能的电网有功承载能力定量指标[J]. 中国电机工程学报,2014,34(13):2088-2099.
ZHU Wei,ZHOU Xiaoxin,JIANG Di,et al. Quantitative index of active power carrying capacity of power grid based on mapping elastic potential energy[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(13):2088-2099.
- [15] 于永源. 电力系统分析[M]. 北京:中国电力出版社,2007:8-10.
- [16] 同济大学数学系. 高等数学第六版下册[M]. 北京:高等教育出版社,2007:101-103.
- [17] 竺炜,李娟,蒋银华,等. 发输电经济及电网安全的综合优化建模方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(17):4335-4344.
ZHU Wei,LI Juan,JIANG Yinhua,et al. A comprehensive optimization modeling method for transmission economy and power grid security[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(17):4335-4344.
- [18] 贾巍,雷才嘉,高慧,等. 计及运行风险的无功优化强化学习智能算法[J]. 电测与仪表,2019,56(14):75-82+123.
JIA Wei,LEI Caijia,GAO Hui,et al. Transfer tribe reinforcement learning algorithm for multi-objective reactive power optimization[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2019,56(14):75-82+123.