

# 考虑自复性指标的弹性电网多目标运行优化

孙可<sup>1</sup>, 王蕾<sup>1</sup>, 杨翺<sup>2</sup>, 翁华<sup>3</sup>, 孙轶恺<sup>1</sup>, 郑杰辉<sup>4</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院, 浙江 杭州 310001; 2. 国网杭州供电公司, 浙江 杭州 310000; 3. 浙江华云电力工程设计咨询有限公司, 浙江 杭州 310000; 4. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641)

**摘要:** 如何在电网安全、低碳和经济成本之间协同以达到社会福利最大化, 对我国提出的“双碳”战略目标有着重大影响。因此提出一种考虑自复性指标的弹性电网多目标优化计算方法, 引入自复性指标的概念, 用于多方面地评估电力系统的运行稳定程度。以自复性指标和系统运行成本作为两个独立优化目标进行优化计算, 再结合 Pareto 优化理论, 采用群搜索算法进行优化, 实现弹性电网多属性协调运行。最后, 通过对 IEEE-30 和 IEEE-57 系统两算例进行测试分析, 以验证本研究方法的正确性和有效性。

**关键词:** 弹性电网; 自复性指标; 群搜索算法; 多目标优化

**中图分类号:** TM74 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24075

## Multi-objective Operation Optimization for Elastic Power Grid Considering Resilience Index

SUN Ke<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, YANG Xuan<sup>2</sup>, WENG Hua<sup>3</sup>, SUN Yikai<sup>1</sup>, ZHENG Jiehui<sup>4</sup>

(1. State Grid Zhejiang Economy Research Institute, Hangzhou 310001, Zhejiang, China; 2. State Grid Hangzhou Power Supply Company, Hangzhou 310000, Zhejiang, China; 3. Zhejiang Huayun Electric Power Engineering Design Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310000, Zhejiang, China; 4. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China)

**Abstract:** How to coordinate between power grid safety, low carbon and economic costs to achieve the maximum social benefits has a great impact on the "double carbon" strategic goal put forward by China government. Therefore, a multi-objective optimization method for elastic power grid considering resilience index was proposed, and the concept of resilience index was introduced, which was used to evaluate the operation stability of the power system in multi-aspects. With resilience index and system operation cost as two independent objectives for optimization calculation, combine with Pareto optimization theory, group search algorithm was adopt to realize the multi-attribute coordination operation of the elastic power grid. Finally, the simulation analysis was conducted on the IEEE-30 and IEEE-57 test systems to verify the correctness and effectiveness of the proposed method.

**Key words:** elastic power grid; resilience index; group search optimizer(GSO); multi-objective optimization

2021 年中央财经委员会第九次会议研究部署实现碳达峰、碳中和的基本思路时指出, 深化电力体制改革, 构建以新能源为主体的新型电力系统。新型电力系统的建设过程中, 为满足整个社会对电力的需求, 需合理利用现有资源, 以最佳的投资效果, 使未来电力系统安全、可靠、经济地运行<sup>[1]</sup>。能源的紧缺和全球环境气候变差等问题, 也使当前的电网面临着保障安全、追求低碳和降低成本等多方面的压力。因此如何在电网

安全、低碳和经济成本之间协同以达到社会福利最大化, 是目前的一个研究重点<sup>[2-4]</sup>。

电网弹性是关于电力系统运行安全的一个重要概念, 有效的弹性评估可以促进电力系统应对突发情况及时响应, 并且快速恢复到正常状态。因此, 以新能源为主体的新型电力系统中, 考虑电网的弹性是必要的<sup>[5]</sup>。文献[6]对考虑时变性的弹性模型进行研究, 并通过故障分析研究修复策略提高电网弹性的效果; 文献[7]提出一种量

**作者简介:** 孙可(1980—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析、稳定和控制等, Email: 751660179@qq.com

**通讯作者:** 郑杰辉(1990—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为电力系统规划与运行等, Email: zhengjh@scut.edu.cn

化弹性指标的评估方法,以此提升微网配电系统弹性。文献[8]在故障渗透阶段考虑电力系统储能与负荷需求的关系,提出可以改善电网弹性的储能调度方案。基于上述文献中提出的衡量电网弹性的指标包括:负荷裕度指标、灵敏度指标、雅可比矩阵最小特征值指标和L指标等<sup>[9]</sup>。以上指标一定程度上都反映了弹性系统的稳定程度。此外,合理的无功补偿分配,也和弹性电网稳定性提升具有紧密的联系<sup>[10]</sup>,这些可作为重要参考。

其中,通过雅可比矩阵最小特征值指标可以判断电力系统整体功角稳定和电压稳定情况<sup>[11]</sup>。L指标计算快速且能够有效反映系统节点电压的稳定情况,被广泛使用<sup>[12]</sup>。文献[13-14]对于考虑L指标约束的最优潮流模型进行研究,但这些模型并未对系统的电压稳定目标实现最优化,其结果仍具有一定的局限性。文献[15]提出了考虑L指标的多目标优化研究,一定程度上提高了系统局部的稳定性,但没有提升系统整体稳定程度。

单个指标评估电力系统的稳定水平虽然比较直观,但也存在信息不全面或者判断可能不准确的风险,都不足以完全反映或用于优化一个庞大复杂电力系统的安全状态,需要采用综合评价理论(comprehensive evaluation theory, CET)<sup>[16]</sup>,从多方面多角度来综合评估整个系统。故文献[17]首次提出自复性指标的概念,结合判断系统整体稳定性的雅可比矩阵指标以及节点的L指标的特性,综合考虑了电力系统电压稳定水平,从而反映系统运行的多方面信息。

基于上述问题,本文提出改进后的自复性指标用于综合评估电力系统的静态稳定性以及提升电网弹性。在弹性电网优化模型中,将自复性指标和燃料费用作为两个独立优化目标,实现系统经济、安全、环保的协调运行,最终采用基于Pareto非支配原则的多目标群搜索优化算法(group search optimizer with multiple producers, GSOMP)求解<sup>[18]</sup>。最后,通过算例分析验证本文所提方法的正确性和有效性。

## 1 弹性电网的自复性指标构建

自复性指标可用于电力系统在某一运行状态下的稳定程度的综合评估,其计算包括降阶雅可比矩阵最小特征值和L指标这两类独立指标的计算,以及两指标的预处理。

### 1.1 基于降阶雅可比矩阵的最小特征值指标

根据电力系统潮流方程进行一阶求导有:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\Delta$ 为矩阵元素的微分符号; $J$ 为雅可比矩阵; $J_{P\theta}, J_{PV}, J_{Q\theta}, J_{QV}$ 为雅可比子矩阵,分别表示有功功率 $P$ 和无功功率 $Q$ 关于电压相角 $\theta$ 和电压幅值 $V$ 的偏导数矩阵。

对雅可比矩阵进行特征值分解,可以得到雅可比矩阵的所有特征值以及系统最小特征值指标,即

$$J = X \Lambda Y^T \quad (2)$$

式中: $\Lambda$ 为雅可比矩阵的特征值对角矩阵; $X, Y$ 分别为满足雅可比矩阵对角化等式成立的左乘矩阵和右乘矩阵。

在本文中定义 $\mu_i$ 为 $\Lambda$ 矩阵中的第 $i$ 个元素,代表雅可比矩阵的第 $i$ 个特征值。

进一步地,对上述的雅可比矩阵进行简化,假设用户在某一时间段内负荷需求不变或者变化甚微,则可以认为该节点有功功率固定,即 $\Delta P = 0$ ,那么可得简化后的有功潮流等式如下:

$$\Delta Q = (J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}) \Delta V \quad (3)$$

令 $J_R = J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}$ ,此即为潮流方程下的降阶雅可比矩阵。通过降阶处理,可减少计算机特征值计算负担,提升运算速度。降阶雅可比矩阵与原雅可比矩阵奇异性变化趋势一致,即两矩阵的最小特征值越小,都代表系统越不稳定;经计算,两者结果偏差很小,可以作为其简化指标。

### 1.2 L指标

L指标是衡量负荷节点电压稳定的指标,用于判断电力系统局部的稳定程度,计算速度相比其他指标更快并且可以反映节点负荷稳定性。系统L指标从系统所有负荷节点选出稳定性最差的节点,使该节点L指标作为电网稳定性的评估指标。系统L指标的大小反映整个系统稳定性最低的局部区域的稳定程度。

#### 1.2.1 L指标模型

一般可定义节点 $j$ 的局部电压稳定指标(即L指标) $L_j$ 为<sup>[19]</sup>

$$L_j = \left| 1 - \sum_{i=1}^{T_G} F_{ji} \frac{V_i}{V_j} \right| \quad (4)$$

式中: $T_G$ 为电力系统所有发电机节点; $V_i, V_j$ 分别为节点 $i, j$ 的电压相量。

$F_{ji}$ 的详细计算方法可见文献[19]。

根据文献[20],L指标还可以采用其他的计算公式表达,在式(4)的基础上,经过推导,L指标还可更加直观地表示为

$$L_j = \sqrt{f^2 + g^2} / V_i \quad (5)$$

其中

$$f = \sum_{i \in T_L} \frac{f_i}{V_i}$$

$$f_i = P_i(R_{ij}\cos\theta_i - X_{ij}\sin\theta_i) + Q_i(X_{ij}\cos\theta_i + R_{ij}\sin\theta_i)$$

$$g = \sum_{i \in T_L} \frac{g_i}{V_i}$$

$$g_i = Q_i(R_{ij}\cos\theta_i - X_{ij}\sin\theta_i) - P_i(X_{ij}\cos\theta_i + R_{ij}\sin\theta_i)$$

式中: $T_L$ 为电力系统负荷节点; $P_i, Q_i, \theta_i$ 分别为节点*i*的有功功率、无功功率、电压相角; $R_{ij}, X_{ij}$ 分别为节点*i, j*之间的电阻和电抗。

网络中所有负荷节点(即*n*个负荷节点)的L指标构成系统稳定指标向量 $L=[L_1 \ L_2 \ \cdots \ L_n]$ ,L指标与电压稳定性的关系为:当 $L<1.0$ 时,节点电压稳定,且数值越低,稳定性越高;当 $L=1.0$ 时,节点处于电压临界稳定状态;当 $L>1.0$ 时,该负荷节点不稳定。

若需对整个系统的电压稳定性进行判断,可以选取电压稳定性最低的节点的L指标作为系统的L指标,即系统最薄弱的负荷节点作为整个电力系统电压稳定性的判断标准。

### 1.2.2 L指标简化处理

实际电力系统中,线路电抗的数值比线路电阻值大很多,且各节点电压相位之间的相对相角差较小,可以近似为零,故L指标可以进行进一步的简化,即

$$L_{sj} = \frac{\sqrt{f_s^2 + g_s^2}}{V_i} \quad (6)$$

其中

$$f_s = \sum_{i \in T_L} \frac{f_{si}}{V_i}$$

$$f_{si} = Q_i X_{ij} \cos\theta_i$$

$$g_s = \sum_{i \in T_L} \frac{g_{si}}{V_i}$$

$$g_{si} = -P_i X_{ij} \cos\theta_i$$

通过算例测试,同一负荷节点的简化L指标与原L指标数值误差率很小,并与原L指标具有相同的变化趋势。此外,将简化前、后L指标对应的节点电压稳定度大小排序,得到了相同的排序结果。这说明简化L指标可以用于电力系统L指

标的监测,在略微降低计算精度的同时,大幅提高计算的速度。

### 1.3 自复性指标的构建

自复性指标是综合了降阶雅可比矩阵最小特征值指标和L指标的一种复合指标。采用该处理方案,一方面保证了电力系统整体的电压安全稳定裕度,另一方面又考虑了系统各节点电压安全稳定裕度。故,可以得到降阶雅可比矩阵最小特征值指标和所有负荷节点的L指标为

$$I_{\text{eigen}}(V) = \min_{j \in N} \{|\mu_j|\} \quad (7)$$

$$L_L(V) = \max_{j \in T_L} \{L_j\} \quad (8)$$

式中: $N$ 为降阶雅可比矩阵所有特征值的个数。

由于降阶雅可比矩阵最小特征值指标与L指标的取值范围不同,为保证加权求和后的自复性指标具有参考意义,需要将雅可比最小特征值指标和L指标进行标一化预处理,从而实现自复性指标的标准化,雅可比矩阵最小特征值指标预处理如下所示:

$$I'_{\text{eigen}}(V) = 1 - e^{-I_{\text{eigen}}(V)} \quad (9)$$

L指标预处理如下所示::

$$I'_L(V) = 1 - I_L(V) \quad (10)$$

经过预处理后,两指标的数值都会随电力系统电压稳定性的提高而增大,同时在电力系统正常工作的范围内,两指标的取值范围都在[0, 1]内,使得范围和单调性统一。

基于上述处理,可得自复性指标模型如下:

$$I(V) = \omega_1 \times I'_{\text{eigen}}(V) + \omega_2 \times I'_L(V) \quad (11)$$

式(11)的权重比 $\omega_1, \omega_2$ 的取值范围应为[0, 1],且两者之和应为1,两指标的权重可根据实际工程中对系统整体和个别节点的重视程度灵活处理。

## 2 弹性电网多目标优化模型

### 2.1 目标函数

#### 2.1.1 系统运行成本最低

本文中采用的系统运行成本模型为

$$f_{\text{cost.min}} = \sum_{i \in T_G} (a_2 \times P_i^2 + a_1 \times P_i + a_0) \quad (12)$$

式中: $f_{\text{cost.min}}$ 为系统的燃料发电成本; $P_i$ 为发电机节点*i*的输出功率; $a_2, a_1, a_0$ 为供电成本特性的曲线系数。

该目标最优可实现燃料使用量减少以及成本减少,达到电网协调低碳、经济运行的目的。

#### 2.1.2 系统电压稳定性最优

由于一般的优化建模是以目标函数最小值

为优化结果,而自复性指标的数值会随着电力系统电压稳定性提高而增大,根据本文提出的自复性指标模型,可以通过下式处理:

$$f_{I(V),\min} = -[0.5 \times I'_{\text{eigen}}(V) + 0.5 \times I'_L(V)] \quad (13)$$

式中: $f_{I(V),\min}$ 为系统的自复性指标。

## 2.2 约束条件

约束条件如下式所示:

$$P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad i, j \in T \quad (14)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad i, j \in T \quad (15)$$

$$-\overline{P}_{ij} \leq P_{ij} \leq \overline{P}_{ij} \quad (16)$$

$$P_{ij} = -V_i^2 G_{ii} + V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad i, j \in T \quad (17)$$

$$\underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \overline{P}_{Gi} \quad i \in T_G \quad (18)$$

$$\underline{Q}_{Gi} \leq Q_{Gi} \leq \overline{Q}_{Gi} \quad i \in T_G \quad (19)$$

$$\underline{V}_i \leq V_i \leq \overline{V}_i \quad i \in T \quad (20)$$

$$|\mu_j| > 0 \quad j \in N \quad (21)$$

$$\underline{L}_i \leq L_i \leq \overline{L}_i \quad i \in T_L \quad (22)$$

式中: $P_{Gi}, Q_{Gi}$ 为节点*i*的发电机组有功、无功出力; $P_{Di}, Q_{Di}$ 为节点*i*的有功、无功负荷; $\theta_{ij}$ 为节点*i, j*之间的电压相角差; $P_{ij}$ 为节点*i, j*之间的线路传输功率; $G_{ij}, B_{ij}$ 为节点*i, j*之间互导纳的实部、虚部; $G_{ii}$ 为节点*i*自导纳的实部; $\overline{x}, \underline{x}$ 为参数范围的上、下限; $T$ 为电力系统所有节点。

## 3 多目标优化算法

常规数学解法一般将多目标化单目标,具有局限性,且得到的单一可行解也不够准确,而智能算法通过搜索的方式寻找到最优 Pareto 解集<sup>[21]</sup>,更符合多目标优化的目的,同时它对于电力系统中常见的非线性优化和离散优化问题有着很强的适应性。在现有智能算法中,GSO算法具有良好的收敛精度和速度<sup>[22]</sup>,本文将采用多目标的GSOMP算法来进行考虑自复性指标的电力系统多目标优化问题求解。

GSOMP算法是一种模拟群居动物觅食行为的智能搜索算法。将一个搜索种群分为3类角色:领头者、追随者和游荡者。

每轮迭代中,当前位置最佳的个体为此轮的领头者,领头者在其所在位置,通过左看、右

看、前看来寻找下一轮的最优位置,其他个体随机地被选为追随者或游荡者,追随者朝领头者的方向前进一段距离,而游荡者朝任意方向随机游动,移动的距离也保持随机性,减少算法会陷入局部最优的风险。与其他算法相比,GSOMP算法在处理多模态函数时能保持良好的性能,应用于复杂工程问题会有明显优势,详细模型可参考文献[23]。

## 4 仿真研究

为验证本文提出的考虑自复性指标的弹性电网多目标优化的可行性和有效性,本文以IEEE-30系统和IEEE-57系统为例进行测试分析,分别命名为算例1和算例2,采用的仿真平台为Matlab 2019b。IEEE-30和IEEE-57的详细参数可参考<https://github.com/MATPOWER/matpower>。

为了分析考虑不同指标的对弹性电网的影响,本文设计了3种测试场景:

场景1:仅考虑L指标和系统运行成本最小的弹性电网的多目标优化。

场景2:仅考虑雅可比最小特征值和系统运行成本最小的弹性电网的多目标优化。

场景3:考虑自复性指标和系统运行成本最小的弹性电网的多目标优化。

在本文分析中,关于自复性指标中的加权处理方案,即式(11),在该部分算例中,选取加权比 $\omega_1, \omega_2$ 均为0.5,即 $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$ ,可保证自复性指标对应电力系统正常运行的取值范围为[0, 1]。同时,电力系统的稳定性提高,自复性指标参数增大,反之则减小。

为研究不同的自复性指标加权方案对于多目标优化结果的影响,选用不同的加权比进行优化。以IEEE-30系统作为优化对象,在算例1中场景3的基础上,改变 $\omega_1$ 的取值,并令 $\omega_2 = 1 - \omega_1$ ,对不同取值下的多目标优化结果进行分析。

### 4.1 算例1的优化结果及分析

将IEEE-30系统的6个发电机节点的电压和有功出力、4个变压器支路的变比、9个负荷节点的无功补偿作为决策变量。本文以燃料费用为横坐标、自复性指标为纵坐标,将最终求得的目标函数结果集,以坐标点集合的形式输出于多目标优化结果图中,便于更加直观地观察和分析。

根据3个指标的概念以及3个场景下独立的运行结果来看,结构和负荷固定的电力系统的电

压稳定性指标只在特定的范围内波动,导致指标的量纲和取值范围不同。为了保证3个场景下优化结果具有可比性,选取不同场景下稳定性指标的基准值,并以优化结果和对应基准值的比值作为稳定性指标数值。在本次IEEE-30节点系统中,分别取3种场景下得到最小的稳定性指标数据作为基准值,即选取L指标基准为0.857 9,雅可比最小特征值指标为0.104 6,自复性指标为0.535 8,如图1所示。

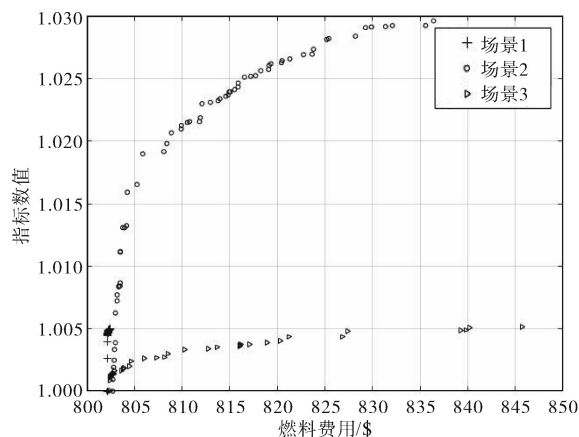


图1 各场景下优化结果对比图

Fig.1 Comparison diagram of the optimized results under each scenario

由图1可以看出,随着系统运行成本的增高,系统的电压稳定性增大,雅可比矩阵最小特征、L指标、自复性指标的数值都会增加。所以在实际工程中,可以牺牲一部分的运行费用,以提高电力系统的静态电压稳定性,从而满足电力系统的安全稳定性要求。

从L指标和系统运行成本两目标的优化结果可以看出,对于IEEE-30系统,当燃料费用升高到一定程度后,L指标几乎不变化,这说明此时的30节点电力系统的各节点已经具有很高的稳定性,即使付出很大的燃料费用代价,也难以再提升。

雅可比矩阵最小特征值指标数值范围从0.106到0.107 7,且在系统运行成本增长到830 \$后,雅可比矩阵最小特征值增长逐渐平缓,并没有随着系统成本的增加而有所提高,即表示系统运行已具有较高的稳定性。

自复性指标随系统运行成本的增长从0.535 8增长到0.538 6,且在成本接近840 \$后时达到最大值。由于自复性指标需要综合雅可比最小特征值指标和L指标,而L指标消耗燃料费用代价提升困难,再加上自复性指标选取的基准值较大,

也就导致自复性指标提升空间差于雅可比最小特征指标。

上述3个算例场景的Pareto前沿对比如表1所示,指标最优值 $I_{p,max}$ 为优化结果中获得的指标最大值;指标最大值 $I_{max}$ 表示该指标理论可以取得的最大值;系统运行成本优化最大值表示优化结果中可取的最大值,即 $F_{p,max}$ ;区间跨度表示最大值和最小值的差值,即 $D_{p,F}$ 。从表1中可以发现,自复性指标优化结果中燃料费用的最大端点值大于L指标的Pareto前沿端点最大值和雅可比矩阵最小特征值指标的端点最大值,说明本文提出的自复性指标优化可以通过以系统运行成本作为代价来保证系统的局部和整体最大程度的稳定性。

表1 各目标优化Pareto前沿对比

Tab.1 Comparison of Pareto front for each objective optimization

| 场景  | $\frac{I_{p,max}}{I_{max}}$ | 燃料费用/\$     |           |
|-----|-----------------------------|-------------|-----------|
|     |                             | $F_{p,max}$ | $D_{p,F}$ |
| 场景1 | 0.862 2                     | 804.4       | 2.4       |
| 场景2 | 0.107 7                     | 836         | 34        |
| 场景3 | 0.538 6                     | 840         | 38        |

由于L指标和雅可比矩阵最小特征值指标反映的电力系统静态稳定性的信息不同,它们虽然都会随电力系统的运行状态改变而变化,但这两个指标的变化也不完全同步,因此电力系统在运行时可能存在L指标和雅可比矩阵最小特征值中一个数值高,另一个数值低(或接近临界稳定)的情况,难以准确全面地判断电力系统的静态稳定程度。而自复性指标的建立将这两个指标综合起来,可以避免上述情况的出现,自复性指标越高,越能全面反映电力系统具有很好的静态稳定性。

同时,IEEE-30系统的双目标优化中,以自复性指标为优化目标的Pareto前沿解比以雅可比矩阵最小特征值指标为目标的Pareto前沿解更靠前,这说明自复性指标的优化也相对减小了牺牲系统运行成本来换取电力系统静态稳定性微弱提升的代价,获得了比其他单一电压稳定指标优化更佳的优化结果。

此外,为了验证GSOMP算法在解决实际优化问题的有效性,将GSOMP算法的优化结果和NSGA-II算法<sup>[24-25]</sup>的结果对比,图2为采用NSGA-II算法求得的IEEE-30节点电力系统双目标优化结果,表2给出了两种算法分别独立运行10次的详细结果对比。

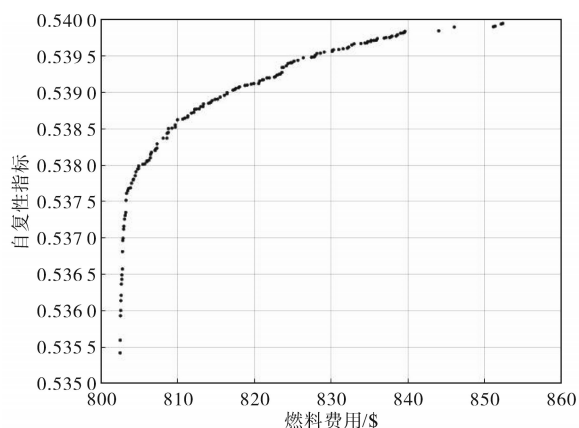


图2 基于NSGA-II算法的场景3的优化结果

Fig.2 Optimization results of scenario 3 based on the NSGA-II algorithm

表2 算例1自复性指标优化对比

Tab.2 Comparison about resilience index optimization of the first example

| 算法      | 最优值     | 最差值     | 中间值     | 平均值     | 标准差      |
|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| GSOMP   | 0.539 0 | 0.537 0 | 0.537 5 | 0.538 2 | 0.000 55 |
| NSGA-II | 0.540 4 | 0.537 6 | 0.539 0 | 0.539 4 | 0.000 91 |

对比图1和图2可以看出,NSGA-II算法和GSOMP算法的结果具有靠前的Pareto前沿,同时具有很好的全局搜索能力。从表2的数据结果可以看出,GSOMP算法独立运算10次后得到的最优自复性指标与NSGA-II结果相比略小,且标准差小,收敛精度优于NSGA-II算法,即GSOMP的局部搜索能力更强。

## 4.2 算例2的优化结果及分析

以IEEE-57节点系统7个发电机节点的电压和有功出力、17个变压器支路的变比、3个负荷节点的无功补偿作为决策变量;自复性指标和系统运行成本为双目标。采用GSOMP算法和NSGA-II算法的双目标优化结果如图3所示。

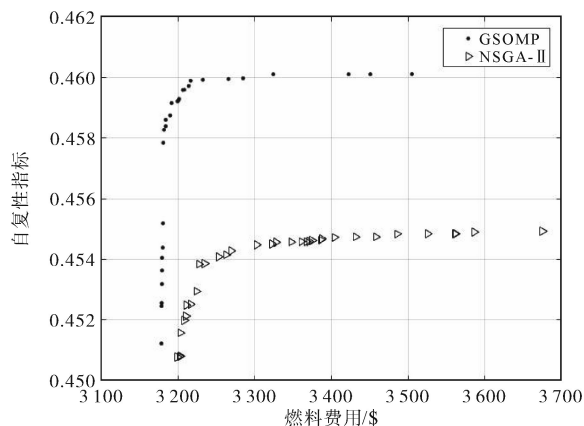


图3 算例2下两算法的优化结果

Fig.3 The optimization results of the two algorithms in the second example

由于IEEE-57系统的决策变量有33个,IEEE-30系统只有24个,优化问题运算维度变高,使得求解难度更大,导致IEEE-57系统的非占优解集相比IEEE-30系统更少。自复性指标随系统运行成本的增长从0.451 2增长,且在燃料费用接近3 505 \$时达到最大值0.460 2。同时也可从图3中看到,算例2下GSOMP算法的非占优解集拥有比NSGA-II算法更靠前的Pareto前沿。

表3给出了两种算法分别就IEEE-57系统优化求解独立运行10次的详细结果对比。

表3 算例2自复性指标优化对比

Tab.3 Comparison about resilience index optimization of the second example

| 方法      | 最优值     | 最差值     | 中间值     | 平均值     | 标准差      |
|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| GSOMP   | 0.460 2 | 0.451 2 | 0.455 7 | 0.459 0 | 0.001 78 |
| NSGA-II | 0.454 9 | 0.450 8 | 0.452 9 | 0.454 1 | 0.002 14 |

从表3可以看出,GSOMP算法得出的最优值结果要比NSGA-II算法的结果更大,标准差更小,这说明GSOMP算法搜索能力更强。同时,随着决策参数的变多,GSOMP在解决高维优化问题的搜索能力比NSGA-II算法更好。GSOMP对于解决多节点电力系统的高维优化问题具有良好的优势。

## 4.3 自复性指标不同加权比组合分析

本小节进一步对不同加权组合的自复性指标进行研究。根据式(11),另外分别选取 $\omega_1$ 为0.1,0.3,0.6,0.7,0.9作为5种加权组合方案。本部分算例采用GSOMP算法进行求解,6种加权方案的多目标优化结果如图4所示。

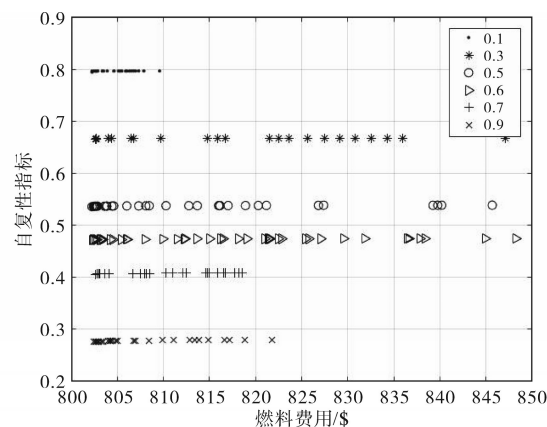


图4 不同加权比下优化结果图

Fig.4 Optimization results about different weighted ratios

根据不同加权比下的优化Pareto前沿图,可以得知,在不同的加权比下,求得的特定系统下的自复性指标取值范围是不一样的,且由系统的

雅可比矩阵最小特征值指标和L指标的范围决定,加权比 $\omega_1$ 的数值大小决定了自复性指标的偏向程度,即 $\omega_1$ 越大,自复性指标更偏向于雅可比矩阵指标的取值范围,反之则更偏向于L指标。这可以为根据电力系统对于具体的整体或者局部安全需要如何合理地调整自复性指标加权比提供重要依据,同时也说明了自复性指标相较于其他电压稳定指标有着更高的灵活性。

以不同加权比下的最优方案运行IEEE-30节点系统,得到的数据(标么值)如表4所示。

表4 不同加权比下的系统运行结果

| $\omega_1$ | 0.1      | 0.3      | 0.5      | 0.6   | 0.7      | 0.9      |
|------------|----------|----------|----------|-------|----------|----------|
| 自复性指标      | 0.796    | 0.666    | 0.539    | 0.474 | 0.408    | 0.283    |
| 雅可比指标      | 0.239    | 0.239    | 0.245    | 0.243 | 0.242    | 0.246    |
| L指标        | 0.138    | 0.138    | 0.138    | 0.138 | 0.138    | 0.137    |
| 电压偏移       | 1.02e-09 | 1.39e-09 | 8.04e-11 | 0     | 5.72e-09 | 7.79e-09 |
| 无功补偿总量     | 30.49    | 26.67    | 18.81    | 22.44 | 26.36    | 32.14    |

从表4中可以看出,不同加权比下的结果,雅可比矩阵指标和L指标相差不多,而自复性指标相差较多,证明了加权比的大小会影响特定系统自复性指标的取值范围。

同时,加权比的调整也会改变优化的结果,虽然对于雅可比矩阵指标和L指标, $\omega_1$ 改变对两者影响较小,但对优化系统的电压偏移和无功补偿总量有较大的影响。同时可以发现, $\omega_1$ 的取值在中间,如0.5和0.6时,电压偏移和无功补偿总量指标更优,甚至出现在取值0.5时达到补偿总量最小以及取值0.6时毫无电压偏移的情况,取值越往两边,以上两指标越大,反而效果更差。从这一角度来看,当 $\omega_1$ 取值范围在[0.5,0.6]这一区间时,可以得到最好的自复性指标效果。

## 5 结论

本文首先提出可以综合评估电压静态稳定性的自复性指标,以自复性指标和系统运行成本作为两个独立优化目标,实现弹性电网的经济、安全协调运行。可以得出以下结论:

1)简化后的L指标和雅可比矩阵指标,在保证计算误差率很小的同时,大幅提高了计算速度。

2)L指标和雅可比矩阵指标随着系统状态改变,数值变化并不同步,而自复性指标综合两指

标后有效解决了该问题,更能全面准确地评估系统安全稳定性。

3)自复性指标在选取合适的加权比(通过算例可认为取值在区间[0.4,0.6]较好)后,能得到更好的自复性指标测评效果,使系统的电压偏移、无功补偿等重要参数得以优化,提升电力系统其他方面的性能。

4)本文采用的GSOMP算法相比NSGA-II算法,具有更高的收敛精度,同时随着搜索空间维度升高,GSOMP算法性能明显优于NSGA-II算法。

## 参考文献

- [1] 赵珂,牟晓正,刘璟洁. 电力系统规划设计在电力工程设计中的应用探究[J]. 中华建设,2020(9):82-83.  
ZHAO Ke, MOU Xiaozheng, LIU Jingjie. Application of power system planning and design in power engineering design[J]. China Construction, 2020(9):82-83.
- [2] 张福民,魏永磊,李占凯,等. 基于改进交叉熵算法的概率最优潮流计算[J]. 智慧电力,2020,48(6):79-84.  
ZHANG Fumin, WEI Yonglei, LI Zhankai, et al. Probabilistic optimal power flow calculation based on improved cross-entropy algorithm[J]. Smart Power, 2020, 48(6):79-84.
- [3] 郝玉国,刘广一,于尔铿. 一种基于Karmarkar内点法的最优潮流算法[J]. 中国电机工程学报,1996,16(6):409-412.  
HAO Yuguo, LIU Guangyi, YU Erkeng. A optimal power flow algorithm based on Karmarkar interior point method[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(6):409-412.
- [4] 钟睿,滕松,梁睿,等. 基于复合储能系统的矿区电网频率弹性提升方法[J]. 电网技术,2019,43(7):2291-2298.  
ZHONG Rui, TENG Song, LIANG Rui, et al. Research on frequency elasticity enhancement method of mining area power grid based on hybrid energy storage system[J]. Power System Technology, 2019, 43(7):2291-2298.
- [5] 周兵凯,杨晓峰,李继成,等. 多元融合高弹性电网关键技术综述[J]. 浙江电力,2020,39(12):35-43.  
ZHOU Bingkai, YANG Xiaofeng, LI Jicheng, et al. Review of key technologies of multiple fusion and high elastic power grid [J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(12):35-43.
- [6] 赵丽敬. 电网的弹性建模与评估[D]. 武汉:华中科技大学,2015.  
ZHAO Lijing. Resilience modeling and assessment of power grid[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [7] 王小豪. 含微网配电系统的弹性评估及弹性提升方法研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2020.  
WANG Xiaohao. Research on resilience assessment and resilience enhancement method of distribution system with micro-grids[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2020.
- [8] 孙伟卿,张婕,叶磊,等. 考虑广义储能的电力系统运行弹性优化[J]. 系统仿真学报,2021,33(4):962-972.

- SUN Weiqing, ZHANG Jie, YE Lei, et al. Operation resilience optimization of power system considering generalized energy storage[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(4): 962-972.
- [9] 周双喜,姜勇,朱凌志. 电力系统电压静态稳定性指标述评[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 1-7.  
ZHOU Shuangxi, JIANG Yong, ZHU Lingzhi. Review on steady state voltage stability indices of power systems[J]. Power System Technology, 2001, 25(1): 1-7.
- [10] 苗海东,王金梅,马文涛,等. 一种改进的微电网无功分配控制策略研究[J]. 电气传动, 2021, 51(1): 51-55.  
MIAO Haidong, WANG Jinmei, MA Wentao, et al. Research on an improved control strategy of reactive power distribution in microgrids[J]. Electric Drive, 2021, 51(1): 51-55.
- [11] 徐成司,王子翰,董树锋,等. 基于潮流雅可比行列式的静态电压稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2096-2108.  
XU Chengsi, WANG Zihan, DONG Shufeng, et al. Static voltage stability analysis based on power flow Jacobian determinant[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2096-2108.
- [12] 侯龙宇. 电力系统电压稳定L指标分析及其改进评价方法[D]. 长沙:湖南大学, 2018.  
HOU Longyu. Analysis of voltage stability of power system and its improved evaluation method[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [13] 贾宏杰,孙晓彦,张沛. 基于L指标的电压稳定约束下的最优潮流[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(1): 34-38, 111.  
JIA Hongjie, SUN Xiaoyan, ZHANG Pei. Optimal power flow with voltage stability constraint based on L index[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2006, 18(1): 34-38, 111.
- [14] LIU Qitao, YOU Minglei, SUN Hongjian, et al. L-index sensitivity based voltage stability enhancement[C]//Vehicular Technology Conference (VTC Spring), IEEE, 2017: 1-5.
- [15] SIVASUBRAMANI S, SWARUP K S. Multi-objective harmony search algorithm for optimal power flow problem[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2011, 33(3): 745-752.
- [16] 武家辉,王维庆,王海云,等. 基于综合权重理论和 fuzzy-TOPSIS综合评价的电网静态电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 77-85.  
WU Jiahui, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Static voltage stability analysis of power grid based on comprehensive weight evaluation method and fuzzy-TOPSIS[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 77-85.
- [17] 章熙,贺先强,覃海,等. 一种基于电压静态稳定性的电力系统自复性指标[J]. 电测与仪表, 2018, 55(21): 9-13.  
ZHANG Xi, HE Xianqiang, QIN Hai, et al. A voltage resilience index of power system based on the static voltage stability[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2018, 55(21): 9-13.
- [18] 王凯,王荣鹏,刘宇,等. 基于 Pareto 最优原理的钻机钻进参数多目标优化[J]. 中国机械工程, 2017, 28(13): 1580-1587.  
WANG Kai, WANG Rongpeng, LIU Yu, et al. Multi-objective optimization of drilling parameters based on Pareto optimality[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(13): 1580-1587.
- [19] LOF P, SMED T, ANDESSON G, et al. Fast calculation of a voltage stability index[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 114-123.
- [20] LI Xiaoteng, ZHAO Jinquan, LIANG Hang, et al. Application of an improved continuous power flow method in voltage stability analysis[C]//International Conference on Systems and Informatics (ICSAI), IEEE, 2019: 244-248.
- [21] 姜涛,李国庆,贾宏杰,等. 电压稳定在线监控的简化L指标及其灵敏度分析方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 13-18.  
JIANG Tao, LI Guoqing, JIA Hongjie, et al. Simplified L index and its sensitivity analysis method of voltage stability online monitoring[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 13-18.
- [22] ZHENG Jiehui, CHEN Jiajia, WU Qinghua, et al. Multi-objective optimization and decision making for power dispatch of a large-scale integrated energy system with distributed DHCs embedded[J]. Applied Energy, 2015, 154: 369-379.
- [23] 郑杰辉. 综合能源系统优化运行及其决策算法研究[D]. 广州:华南理工大学, 2017.  
ZHENG Jiehui. Research on integrated energy system optimization operation and its decision algorithms[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [24] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18(4): 577-601.
- [25] JAIN H, DEB K. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part II: handling constraints and extending to an adaptive approach[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18(4): 602-622.

收稿日期:2021-11-11

修改稿日期:2021-12-14