

# 复合电压薄弱性指标及以其为导向的无功优化策略

刘庆珍<sup>1</sup>, 黄君莹<sup>1</sup>, 王少芳<sup>2</sup>

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院 福建省新能源发电与电能变换重点实验室, 福建 福州 350108;  
2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘要:**提出了一种新的电力系统薄弱环节确定指标,并提出以系统薄弱环节分析为导向的多目标函数无功优化方法。首先,融合薄弱性指标电压和功率两方面的特点和优势,定义了新的薄弱环节复合裕度判定指标,综合描述负荷正常工作点与电压崩溃点的距离;以该指标为判定标准识别出系统的电压薄弱环节点集,由此点集构成无功优化的待补偿节点集。然后,建立多目标无功优化模型,采用改进自适应遗传算法,在算法选择环节采用确定式选择原则替换传统轮盘赌法,进而完成多目标无功优化模型求解。最后,以IEEE 30节点系统和新英格兰IEEE 39节点系统为仿真试验案例,通过优化后多项系统运行指标与传统方法计算结果的对比,验证了以新的薄弱环节判定指标为无功优化策略的有效性和优越性,同时也证明了改进后的自适应遗传算法在多目标无功优化计算中的高效性。

**关键词:**薄弱环节;复合裕度指标;多目标无功优化;自适应遗传算法;确定式选择原则

**中图分类号:**TM761

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202303004

## 0 引言

系统电压稳定性一直是电力系统运行与管理的重要课题。系统缺少足够的无功支持是引起电压不稳定的主要原因<sup>[1]</sup>。无功优化策略成为电力系统安全稳定运行的必要手段<sup>[2]</sup>。电压薄弱环节是系统稳定性控制的关键,而依据系统薄弱环节的无功优化对系统稳定性有更好的支撑作用。这使得系统薄弱环节的识别在系统运行和制定无功补偿策略中具有重要作用。

系统电压薄弱环节是整个电力系统中最薄弱的节点或区域,电压失稳通常是由薄弱环节电压降落引起的。因此系统稳定性分析是确定电压薄弱环节的主要方法。系统电压稳定性通常通过电压稳定指标来判别。在目前的研究中,电压稳定指标主要分为状态指标和裕度指标2类<sup>[3]</sup>:常用的状态指标包括特征值指标、线路电压稳定指标、灵敏度指标、局部电压稳定L指标等<sup>[4-6]</sup>;常用的裕度指标包括功率裕度指标和电压裕度指标<sup>[7]</sup>。2类指标在电力系统中已经得到了广泛的应用。文献[4]根据临界状态下线路电压稳定指标变化捕获最佳安装位置;文献[5]提出一种基于奇异值分解理论的方法确定无功补偿点;文献[6]提出了以局部电压稳定L指标为基础的负荷节点电压稳定裕度概念;文献[8]构造基于电压二元表的区域暂态电压安全裕度指标,用于识别系

统无功补偿点;文献[9]提出一种基于局部电压稳定指标的裕度灵敏度分析新方法。实际上,采用传统裕度指标识别系统薄弱环节时,通常仅以功率或电压作为薄弱性指标,反映的角度过于单一。

无功补偿是提高系统电压稳定性的主要技术手段之一。近年来,多数研究通过系统的电压稳定性水平来优化和确定无功补偿。传统无功补偿策略以经济效益最优或其他成本最小为目标函数,建立合适的数学模型,并采用优化算法求解<sup>[10-12]</sup>。由于对全网进行补偿点搜索的优化方式较少计及系统电压稳定性和电压薄弱环节,这种全网搜索优化具有一定的盲目性,其计算结果对实际运行的指导意义不大。因此,学者们开始依据系统的电压稳定性水平来优化和确定无功补偿。比如文献[13-14]提出依据薄弱节点或稳定裕度指标进行无功补偿,其电压薄弱性分析采用的指标为电压裕度或功率裕度这2类常规方法。

本文定义一种新的电压薄弱环节分析衡量指标,即复合电压稳定裕度指标,能较全面地反映系统电压稳定性和稳定裕度;并采用改进的自适应遗传算法对多目标无功优化模型进行求解,提高优化策略的运行效率。算例仿真验证了本文系统复合薄弱性指标的优越性,以其为导向的多目标无功优化策略能在补偿装置投运最少的情况下有效降低网络损耗,提高全网稳定裕度,实现系统运行效益的最大化。

## 1 系统复合电压薄弱性指标

在现有研究中,通过比较节点稳定裕度以确定薄弱环节<sup>[15]</sup>。连续潮流法被广泛应用于电力系统静态电压稳定性分析中的系统稳定裕度计算<sup>[16]</sup>。利

收稿日期:2022-09-22;修回日期:2022-12-21

在线出版日期:2023-03-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807030)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51807030)

用连续潮流法有效模拟其变化负荷过渡过程,求取电压临界点的最大负荷与正常运行负荷的差异。

### 1.1 复合电压稳定裕度指标的定义

采用连续潮流法求取电压稳定裕度,可以绘制出负荷节点电压与一个区域负荷或传输界面潮流之间的关系曲线<sup>[14]</sup>,即PV曲线,如图1所示。图中: $P_{\max}$ 为系统临界有功负荷; $P_0$ 为系统当前有功负荷; $U$ 、 $P$ 分别为系统电压及有功负荷。曲线上半段表示系统处于电压稳定运行状态,下半段表示处于不稳定运行状态。当有功负荷总量大于临界有功负荷时,电压失稳进而崩溃<sup>[17]</sup>。因此,系统保持电压稳定的前提是要保证实际有功负荷小于临界有功负荷。

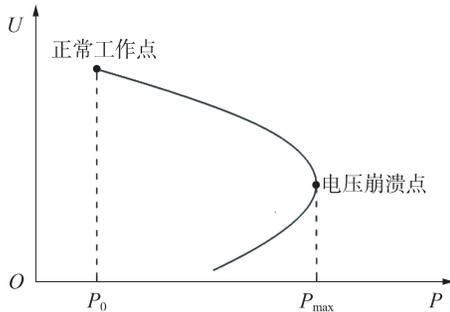


图1 系统PV曲线  
Fig.1 PV curve of system

通过不同的设定方式可以得到不同的电压稳定裕度。选择负荷增长区域为全网负荷节点或单负荷节点,可分别得到全网电压稳定裕度和节点电压稳定裕度指标。

全网电压稳定裕度指标用于衡量全网的有功承载能力,表征了全网节点负荷等比例沿着特定增长方向从运行点到临界点的距离。全网电压稳定裕度指标值 $\xi$ 的计算表达式为<sup>[17]</sup>:

$$\xi = \frac{P_{\max} - P_0}{P_0} \quad (1)$$

节点电压稳定裕度指标用于衡量节点的抗负荷扰动能力,以单节点负荷增长考察其运行极限。节点电压稳定裕度指标包括电压裕度指标和功率裕度指标,指标计算分别定义如下<sup>[7]</sup>。

电压裕度指标值 $\xi_{VSM}$ 的计算表达式为:

$$\xi_{VSM} = \frac{U_{\text{initial}} - U_{\text{critical}}}{U_{\text{critical}}} \quad (2)$$

式中: $U_{\text{initial}}$ 为正常工作点节点电压; $U_{\text{critical}}$ 为电压崩溃点节点电压。

功率裕度指标值 $\xi_{LPM}$ 的计算表达式为:

$$\xi_{LPM} = \frac{P_{\text{critical}} - P_{\text{initial}}}{P_{\text{initial}}} \quad (3)$$

式中: $P_{\text{critical}}$ 为电压崩溃点的负荷值; $P_{\text{initial}}$ 为正常运行点的负荷值。

从节点裕度指标的构成可看出,这2种指标的共同点都是抓住极限运行状态的不同特征作为薄弱

环节的判据。 $\xi_{VSM}$ 是从电压角度衡量正常工作点到崩溃点的电压变化率, $\xi_{LPM}$ 则是从功率角度衡量正常工作点到崩溃点的功率变化率,2种指标考虑方向各不相同,识别结果存在差异。同时,在系统运行中,负荷并非全部等比例增长,局部区域的负荷增长往往更加普遍。

本文基于这2种裕度指标,考虑电压裕度和功率裕度所反映的特征,综合定义电压薄弱性指标,即复合电压稳定裕度指标。现依据图2所示系统连续潮流曲线,同时考虑电压和功率达到稳定极限的距离,将连续潮流曲线中负荷可稳定运行区域面积(如图2阴影部分所示)定义为新的识别系统薄弱环节指标,即复合裕度指标 $S_{PVi}$ 。图中: $U_N$ 、 $U_\lambda$ 分别为正常工作点和电压崩溃点的电压幅值; $\lambda_0$ 、 $\lambda_{\max}$ 分别为正常工作点和电压崩溃点的负荷增长系数; $\lambda$ 为负荷增长系数。系统中任意节点 $i(i=1,2,\dots,n)$ ,其中 $n$ 为系统节点总数)的复合裕度 $S_{PVi}$ 定义如式(4)所示。

$$S_{PVi} = \int_{U_\lambda}^{U_N} f(\lambda, V) dV \quad (4)$$

式中: $f(\lambda, V)$ 为节点 $i$ 的PV曲线函数。

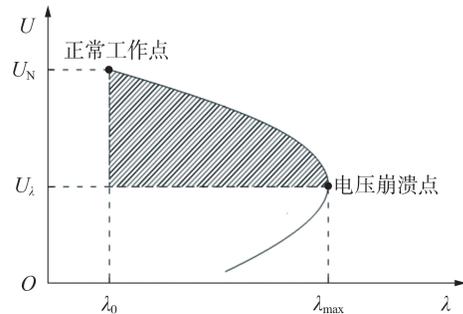


图2 节点i的PV曲线  
Fig.2 PV curve of Node i

式(4)所确定的复合裕度指标反映了节点安全稳定运行的区域大小,其定义包含了节点电压稳定性与节点功率稳定性的综合度量,是节点电压稳定裕度更加宏观的表示。其值越大,则表明该节点可安全稳定运行的区域越大;其值越小,则表明该节点可安全稳定运行的区域越小。

### 1.2 系统薄弱环节的识别

如图2所示,对于节点 $i$ 而言,其可稳定运行区域越大,正常工作点与电压崩溃点的距离越远,电压越不易崩溃,即节点 $i$ 的可稳定运行区域越小,该节点越薄弱。如果考虑系统稳定运行的具体要求,或要求电压浮动不超过 $\pm 10\% U_N$ ,则可以按照式(5)计算薄弱性指标 $S_{PVi}$ 。

$$S_{PVi} = \int_{0.9U_N}^{U_N} f(\lambda, V) dV \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可看出,负荷变动导致电压偏移以及连续潮流计算结果偏差,即负荷的变动会使

薄弱环节发生偏移,由于各节点的基础运行状态不同,偏移量会大不相同。薄弱环节分析及判别在负荷变动时受影响较大的负荷节点。因此如果在电压薄弱环节处进行无功补偿,就能有效地改善系统稳定性<sup>[13-14]</sup>。根据新的薄弱性复合指标,可以更好地评估电压区域性失稳风险。本文通过搜索系统薄弱环节作为无功优化的前提,对所有节点的复合薄弱性指标值 $S_{pvi}$ 进行排序,从而将指标值最小的节点集合作为无功优化的待补偿节点集。

## 2 基于薄弱环节补偿点集的无功优化

基于1.2节的论述,在薄弱环节处进行无功补偿,可以有效提高系统的稳定性。因此电压薄弱点的确定是无功优化的重要依据。本文首先计算所有节点的复合裕度指标,得到待补偿节点集,同时建立以综合效益最大为目标函数的无功优化模型,采用改进遗传算法对模型进行求解。

### 2.1 待补偿节点的确定

基于本文第1章的论述,在进行系统无功优化时,首先对系统进行电压薄弱环节分析,利用所提出的复合裕度指标,计算出系统各节点的复合裕度指标;并对其进行由小到大排序整理,选取系统稳定复合裕度指标最小的节点构成电压薄弱点集合;进而由该点集构成无功优化补偿的重点待补偿点集。

无功优化中待补偿节点集的计算流程为:①选择负荷增长区域为单节点,绘制其PV曲线;②利用式(4)或式(5)计算节点的复合裕度指标 $S_{pvi}$ ;③将所有节点复合裕度指标由小到大排序;④参考系统补偿点数量要求,选取电压薄弱性指标值最小的相关节点构成待补偿节点集。

待补偿点集确定后,这些节点就作为无功补偿的重点区域。但如何依据系统运行确定合适的无功补偿量使系统运行获取最大的经济效益,仍需通过对补偿容量优化计算来实现。确定以经济效益最高为目标函数,并通过高效的智能优化算法求解,这是当前无功优化的主要方法。

### 2.2 多目标无功优化的数学模型

#### 2.2.1 目标函数

为了符合当下新型电力系统需求,本文在文献<sup>[13]</sup>的基础上,考虑电网运行中的多种因素,为达到补偿的综合经济效益最大,建立了多目标无功优化的数学模型。目标函数 $f_1^o \sim f_3^o$ 分别从以下几个方面进行确定:①有功网络损耗最小,需考虑最大负荷利用小时数;②无功设备投资成本最小;③电压偏移绝对值最小。 $f_1^o \sim f_3^o$ 的表达式分别为:

$$\min f_1^o = B\tau_{\max} P_{\text{loss}}^N \quad (6)$$

$$\min f_2^o = \sum_{k=1}^r C_k Q_{Ck} \quad (7)$$

$$\min f_3^o = \sum_{j=1}^n \left| \frac{U_j - U_j^*}{\Delta U_j^{\max}} \right| \quad (8)$$

式中: $B$ 为修正后的有功电价; $\tau_{\max}$ 为全网的年最大负荷利用小时数; $P_{\text{loss}}^N$ 为最大有功损耗; $r$ 为待装无功补偿设备的数目; $C_k$ 为第 $k$ 个补偿点的补偿设备经过修正的单位容量价格; $Q_{Ck}$ 为待补偿电容器容量; $U_j$ 为节点 $j$ 电压幅值; $U_j^*$ 为节点 $j$ 的额定电压幅值; $\Delta U_j^{\max}$ 为节点 $j$ 允许的最大电压偏移值,即 $\Delta U_j^{\max} = U_j^{\max} - U_j^{\min}$ , $U_j^{\max}$ 、 $U_j^{\min}$ 分别为节点 $j$ 电压的最大、最小值。

为了使无功容量向期望多补偿的节点上倾斜,在无功补偿项上加相应的系数 $S_k$ ,即:

$$\min f_2^o = \sum_{k=1}^r S_k C_k Q_{Ck} \quad (9)$$

式中: $S_k$ 为第 $k$ 个无功补偿节点对应的复合裕度指标。

依据各目标函数在优化目标中的侧重程度不同,采用线性加权法对其进行加权处理,如式(10)所示。

$$\min F = \sum_{i=1}^3 \omega_i f_i^o \quad (10)$$

式中: $\omega_i$ ( $i=1,2,3$ )为目标函数 $f_i^o$ 的加权因子。

#### 2.2.2 约束条件

无功优化约束条件分为等式约束和不等式约束条件2类。对于 $n$ 节点系统,无功优化的等式约束方程为正常运行状态下潮流方程<sup>[18]</sup>。其不等式约束包括系统中发电机端电压限值、系统节点电压限值、无功补偿装置出力限值以及系统中可调变压器分接头的调节上下限值<sup>[19]</sup>。

### 2.3 改进的自适应遗传算法

近年来群体智能优化算法发展迅速,逐渐被应用于解决系统全局寻优问题。遗传算法因具有在搜索过程中不依赖梯度信息、可自动积累搜索空间的有用信息、自适应地在全局范围内求得最优解等优点,在各类智能优化算法中依然具有较大优势。本文在传统遗传算法的基础上引入确定式选择原则与交叉变异动态公式对其进行改进,以适应多目标函数求解,提高算法运算效率及其收敛性能。

#### 2.3.1 准确性选择原则

选择环节采用确定式选择原则替换传统轮盘赌法,确保适应度较大的个体被保留到下一代群体中。确定式选择具体操作过程如下。

1)计算各个个体在下一代群体中的期望生存数量 $N_i$ ,如式(11)所示。

$$N_i = M f_i / \sum_{i=1}^M f_i \quad (11)$$

式中: $M$ 为种族规模; $f_i$ 为适应度函数值。

2)用整数部分确定各个个体在下一代群体中的生存数目 $\sum_{i=1}^M N_i$ 。

3)按照小数部分对个体进行降序排序,顺序取前  $M - \sum_{i=1}^M N_i$  个个体加入下一代群体。

### 2.3.2 交叉变异动态公式

引入交叉变异动态公式,使算法在迭代初期促进新个体生成,在迭代后期快速收敛。即根据适应度值自适应地改变交叉概率  $P_c$  和变异概率  $P_m$ , 分别如式(12)、(13)所示。

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}} & f' \geq f_{avg} \\ P_{c1} & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (12)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f_{max} - f)}{f_{max} - f_{avg}} & f \geq f_{avg} \\ P_{m1} & f < f_{avg} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $f_{max}$  为群体的最大适应度;  $f_{avg}$  为每代群体的平均适应度;  $f'$  为要交叉的2个个体中较大的适应度;  $f$  为要变异的个体的适应度;  $P_{c1}=0.9$ ;  $P_{c2}=0.6$ ;  $P_{m1}=0.1$ ;  $P_{m2}=0.001$ 。

## 3 算例分析

本文基于 MATLAB 软件平台编写程序,选择 IEEE 30 节点系统和新英格兰 IEEE 39 节点系统作为测试系统对薄弱环节的识别效果进行验证。数学模型中部分参数取值如下:  $B=600$  元 / (MW·h);  $\tau_{max}=3600$  h / a;  $r=4$ ;  $C_k=23000$  元 / Mvar; 待补偿电容器最小容量  $Q_{Ckmin}=0$ ; 待补偿电容器最大容量  $Q_{Ckmax}=20$  Mvar。

### 3.1 算例1

将 IEEE 30 节点系统的负荷作为日负荷中的平段水平,峰段负荷采用平段水平的1.2倍。

#### 3.1.1 待补偿节点集与无功优化结果

本文参考文献[17]中的设定,取系统负荷节点总数的20%为要求的无功补偿点个数,即6个。根据第1章薄弱环节分析方法计算各节点的复合裕度指标  $S_{PVi}$  如表1所示(表中  $S_{PVi}$  为标么值,后同)。

表1 各节点复合裕度指标值

Table 1 Compounding margin indicator value of each node

节点	$S_{PVi}$	节点	$S_{PVi}$
3	4.25801	18	0.84815
4	2.78315	19	0.27059
7	0.43625	20	1.28646
10	1.23778	21	0.20210
12	0.61184	23	0.67110
14	0.47426	24	0.22972
15	0.58190	26	0.16806
16	0.91007	29	0.39684
17	0.37158	30	0.10969

据表1的计算结果,选取复合裕度指标值最小的6个节点为新增补偿点,并将其构成无功优化的待补偿节点集{17, 19, 21, 24, 26, 30}。

### 3.1.2 无功优化结果分析

1)改进后的自适应遗传算法的无功优化性能。

采用传统遗传算法与改进后的自适应遗传算法求解第2章所建优化模型。采用传统遗传算法的收敛时间为10.01 s;而采用改进后的自适应遗传算法的收敛时间为8.91 s,其收敛速度更快,且计算时间更短。采用改进后的自适应遗传算法计算,得出各补偿节点的补偿容量见表2。

表2 无功优化补偿容量

Table 2 Optimal compensation capacity of reactive power

补偿节点	补偿容量 / (MV·A)
17	7.2208
19	6.7974
21	10.3283
24	6.0009
26	3.0117
30	4.2367
总补偿容量	37.5958

表3为无功优化前、后的网络损耗、全网电压稳定裕度及薄弱节点电压稳定裕度。由表可知:无功优化后网络损耗约降低了3.8%;全网电压稳定裕度增大了12%,提高了未来对新增负荷的承载能力;所有薄弱节点的节点电压稳定裕度均有所增大,缓解了因局部电压失稳而造成的电压崩溃。可见,通过无功优化,不仅降低了系统有功网络损耗,还提高了系统电压稳定性。

表3 算例1中优化前、后的运行指标对比

Table 3 Comparison of operating indicators before and after optimization in Case 1

阶段	网络损耗 / MW	全网电压稳定裕度	薄弱节点电压稳定裕度					
			节点17	节点19	节点21	节点24	节点26	节点30
优化前	10.02	1.00	15.46	10.05	7.47	9.42	6.31	2.52
优化后	9.64	1.12	17.26	10.71	7.93	10.11	7.02	2.84

2)不同补偿节点集的优化结果分析。

为检验本文所提出的复合裕度指标的性能,分别采用电压裕度指标、功率裕度指标和本文所提出的复合裕度指标进行薄弱环节分析,选取每一种分析方法下,指标值最差的前6个电压薄弱节点作为无功补偿节点集;同时,以常规全局寻优指标进行无功优化,以补偿效果最好的1组6个节点构成对照组,称之为全局优化集(global optimization set, GOS)。经计算,不同指标分析后确定的无功补偿点以及表征补偿效果的数据如表4所示(优化前网络损耗约

为 10.02, 全网电压稳定裕度约为 0.996)。

表 4 算例 1 中不同薄弱环节识别指标的优化补偿结果

Table 4 Optimal compensation results of different weak link identification indicators in Case 1

待补偿节点 识别指标	无功补偿 节点	网络损耗 / MW	全网电压 稳定裕度
复合裕度指标	17, 19, 21, 24, 26, 30	9.64	1.119
电压裕度指标	19, 23, 24, 26, 29, 30	9.71	1.108
功率裕度指标	19, 21, 24, 26, 29, 30	9.66	1.118
常规全局寻优指标	15, 17, 19, 21, 23, 29	9.67	1.117

由表 4 可以看出, 4 种优化补偿方法均降低了网络损耗并提高了电压稳定裕度。同时还可以看出, 采用 3 种薄弱性指标确定的无功待补偿点集不同, 而采用本文提出的复合薄弱性指标确定待补偿点集与另外 2 种指标确定出来的点集差异更大, 这是因为 3 种指标所关注的系统崩溃的重点不同, 而复合裕度指标能够同时考虑系统的电压和功率裕度, 从较为全面的角度来考察系统的薄弱环节。

同时, 由表 4 还可以明显看出, 对 4 组补偿节点集进行无功优化, 在复合薄弱性指标确定的优化结果中, 网络损耗比另外 3 组优化方式计算结果都少; 同时, 其全网电压稳定裕度为 4 组中最大, 即通过本文指标识别补偿后的网络最稳定。

为了进一步验证薄弱环节分析补偿效果的经济性, 根据前文数据计算出表 4 中无功补偿设备的投资成本  $\eta_{\text{cost}}$  以及 2 a 后在网络损耗上可节省费用 (除去成本)  $\eta_{\text{save}}$ , 如式 (14) 所示。

$$\begin{cases} \eta_{\text{cost}} = C_k Q_{Ck} \\ \eta_{\text{save}} = 2\Delta P_{\text{loss}} B\tau_{\text{max}} - \eta_{\text{cost}} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\Delta P_{\text{loss}}$  为无功补偿前后网络损耗差值。计算结果如表 5 所示。由表可知, 在本文寻优模式下进行无功补偿, 2 a 在收回无功补偿设备的投资成本的情况下, 运行总费用的节省额为 4 组中最多, 共节约费用 78.77 万元。

表 5 算例 1 中不同寻优模式下的综合经济性对比

Table 5 Comprehensive economy comparison under different optimal selection modes in Case 1  
单位: 万元

待补偿节点识别指标	$\eta_{\text{cost}}$	$\eta_{\text{save}}$
复合裕度指标	86.47	78.77
电压裕度指标	65.58	67.26
功率裕度指标	79.03	78.05
常规全局寻优指标	95.13	54.17

不同的目标函数设定和优化过程的参数设定, 优化的结果会不同。本文结合当下的电费及设备成本进行成本和收益函数构建, 虽不能与现实情况完全一致, 但对照组按照相同的规则和条件进行优化, 其结果能反映出算法和模型的优化效果。

### 3.2 算例 2

基于新英格兰 IEEE 39 节点系统, 根据本文提出的复合裕度指标得出的无功优化待补偿节点集为 {4, 7, 8, 12, 15, 20, 27}。并采用改进后的自适应遗传算法计算出系统无功优化前后的网络损耗、全网电压稳定裕度以及各薄弱节点电压稳定裕度如表 6 所示。由表可知, 无功优化策略降低了系统的网络损耗, 且全网电压稳定裕度和薄弱节点电压稳定裕度均有所增大, 系统电压稳定性得到提高。

表 6 算例 2 中优化前、后的运行指标对比

Table 6 Comparison of operating indicators before and after optimization in Case 2

阶段	网络损耗 / MW	全网电 压稳定 裕度	薄弱节点电压稳定裕度						
			节点 4	节点 7	节点 8	节点 12	节点 15	节点 20	节点 27
优化前	42.74	0.28	2.01	5.06	1.70	6.66	3.57	1.34	4.50
优化后	42.22	0.29	2.04	5.14	1.74	6.75	3.63	1.36	4.56

表 7 为采用不同待补偿点识别指标进行薄弱环节分析和无功优化, 计算所得的无功补偿节点集以及表征补偿效果的数据。由表可见, 3 种优化方法均在降低网络损耗的同时提高了全网电压稳定裕度, 其中采用复合裕度指标识别的优化方法时网络损耗最少, 全网电压稳定裕度最大, 即以本文所提指标识别系统电压的薄弱环节所得无功补偿效果最好。

表 7 算例 2 中不同薄弱环节识别指标的优化补偿结果

Table 7 Optimal compensation results of different weak link identification indicators in Case 2

待补偿节点 识别指标	无功补偿节点	网络损耗 / MW	全网电压 稳定裕度
复合裕度指标	4, 7, 8, 12, 15, 20, 27	42.22	0.284
电压裕度指标	4, 7, 8, 12, 15, 27, 28	42.25	0.283
功率裕度指标	3, 4, 8, 15, 16, 20, 27	42.30	0.283

## 4 结论

本文建立了一种基于薄弱环节分析的无功规划方法。经过理论论证和仿真验证, 有如下结论:

1) 提出了一种新的系统电压薄弱性指标——复合裕度指标, 该指标同时考虑电压和功率 2 个方面, 全面描述负荷节点可稳定运行区域, 即正常工作点与电压崩溃点的距离;

2) 建立了基于薄弱环节分析确定无功优化带补偿节点集的多目标无功优化模型, 改进了自适应遗传算法完成多目标函数求解, 提高了优化运算效率;

3) 通过 2 个算例计算和多个角度的性能比较分析, 证明了本文提出的以系统复合薄弱性指标为导向的多目标无功优化策略在补偿装置投运最少的情况下可以更加有效降低网络损耗, 提高全网稳定裕度, 实现系统运行效益的最大化。

## 参考文献:

- [1] 张沛, 马瑞璘, 周钰朋, 等. 中国和北美可靠性标准对比分析及对中国的启示[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 119-128.  
ZHANG Pei, MA Ruilin, ZHOU Yupeng, et al. Comparative analysis and enlightenment of reliability standards of power systems in China and North America[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 119-128.
- [2] 胡丹尔, 彭勇刚, 韦巍, 等. 多时间尺度的配电网深度强化学习无功优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5034-5045.  
HU Daner, PENG Yonggang, WEI Wei, et al. Multi-timescale deep reinforcement learning for reactive power optimization of distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5034-5045.
- [3] 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.
- [4] LI Chongtao, CAO Yulei, DUAN Chao, et al. A feasible delay margin sensitivity analysis method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2713-2716.
- [5] 张志强, 苗友忠, 李笑蓉, 等. 电力系统无功补偿点的确定及其容量优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(3): 92-97.  
ZHANG Zhiqiang, MIAO Youzhong, LI Xiaorong, et al. Location selection of reactive power compensation and compensation capacity optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(3): 92-97.
- [6] 陶文娟, 钟俊, 黄宏光. 电力系统无功补偿点的选取及优化方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(3): 116-121.  
TAO Wenjuan, ZHONG Jun, HUANG Hongguang. Selecting and optimization method of reactive power compensation node in power system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(3): 116-121.
- [7] NOR A F M, SULAIMAN M, OMAR R. Study of voltage and power stability margins of electrical power system using ANN [C]//4th IET Clean Energy and Technology Conference. Kuala Lumpur, Malaysia: IET, 2018: 1-7.
- [8] 徐艳春, 蒋伟俊, 汪平, 等. 考虑暂态电压稳定的含高渗透率风光的电网动态无功规划方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 79-88.  
XU Yanchun, JIANG Weijun, WANG Ping, et al. Dynamic reactive power planning method for power grid with high permeability wind power and photovoltaic considering transient voltage stability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 79-88.
- [9] 潘学萍, 李乐, 黄华, 等. 综合灵敏度和静态电压稳定裕度的直流受端交流系统电压薄弱区域评估方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 1-8.  
PAN Xueping, LI Le, HUANG Hua, et al. Method for evaluating voltage weak area of AC power system at DC receiving end considering sensitivity and static voltage stability margin [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 1-8.
- [10] 徐吉智, 张新燕, 常喜强, 等. 基于PV曲线和改进遗传算法储能选址定容研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(1): 263-268.  
XU Jizhi, ZHANG Xinyan, CHANG Xiqiang, et al. Research on energy storage location and capacity determination based on PV curve and improved genetic algorithm [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(1): 263-268.
- [11] 唐佳, 王丹, 贾宏杰, 等. 基于元模型辅助粒子群算法的主动配电网最优经济运行[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 95-103.  
TANG Jia, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Optimal economic operation of active distribution networks based on hybrid algorithm of surrogate model and particle swarm optimization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 95-103.
- [12] 徐岩, 张荟, 孙易洲. 基于变异粒子群算法的主动配电网故障恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(12): 45-53.  
XU Yan, ZHANG Hui, SUN Yizhou. Fault recovery strategy of active distribution network based on mutation particle swarm optimization algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 45-53.
- [13] 王强, 陈浩, 刘炼. 基于自然梯度提升的静态电压稳定裕度预测及其影响因素分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(9): 130-137.  
WANG Qiang, CHEN Hao, LIU Lian. Prediction of static voltage stability margin based on natural gradient boosting and analysis of its influencing factors [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(9): 130-137.
- [14] 吴倩红, 韩蓓, 李国杰, 等. 极高光伏渗透率下基于潮流雅可比矩阵和卷积神经网络的静态电压稳定在线预测[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4058-4068.  
WU Qianhong, HAN Bei, LI Guojie, et al. Power flow Jacobian matrix based static voltage stability forecast by CNN considering extremely high PV penetration [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4058-4068.
- [15] 张谦, 郑惠萍, 王金浩, 等. 基于AQ节点的电力系统静态电压稳定裕度计算方法[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 714-721.  
ZHANG Qian, ZHENG Huiping, WANG Jinhao, et al. A method for calculating static voltage stability margin of power system based on AQ bus [J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 714-721.
- [16] HUANG R M, DU X Z, LAN L, et al. Static voltage stability margin calculation and characteristics of very large urban power grid [C]//2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Xi'an, China: IEEE, 2019: 1493-1497.
- [17] 燕思旻, 沈沉, 王雅婷. 基于Levenberg-Marquardt算法的大规模系统无功补偿决策方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4864-4872, 5110.  
YAN Simin, SHEN Chen, WANG Yating. Levenberg-Marquardt algorithm based VAR compensation method for large-scale power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4864-4872, 5110.
- [18] PATEL N K, SUTHAR B N, THAKKAR J. Transmission congestion management considering voltage stability margin [J]. SN Applied Sciences, 2021, 3(2): 261.
- [19] 阳育德, 陶琢, 刘辉, 等. 电力系统静态安全最优潮流并行计算方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 99-105.  
YANG Yude, TAO Zhuo, LIU Hui, et al. Parallel computation methods for static security-constrained optimal power flow of power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 99-105.

## 作者简介:

刘庆珍(1971—),女,副教授,博士,主要研究方向为电力系统分析(E-mail: lqz515@126.com);

黄君莹(1998—),女,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为电力系统分析(E-mail: 616070550@qq.com);

王少芳(1977—),男,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为电网调度自动化、输配网协同运行分析、主动配电网(E-mail: wangshaofang@epri.sgcc.com.cn)。

(编辑 王欣竹)

(下转第159页 continued on page 159)

## Optimal dispatch method with minimum generator considering static voltage stability constraint

DENG Xiaofan<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, LIU Jiantao<sup>1</sup>, ZHENG Chunxu<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. State Grid Zibo Power Supply Company, Zibo 255000, China)

**Abstract:** The control number in voltage stability control is large, and the control measure is required to quickly response in the emergency state. An optimal dispatch mathematical model with the minimum adjustment number of generators as the object is constructed, which is a nonlinear mixed integer programming problem containing discrete variables and continuous variables. In order to quickly obtain high-quality feasible solutions, a staged solution method consisting of rapid screening and model transformation is proposed. The sensitivity of load margin to generator active power output is used to quickly screen out the generator set that can improve the load margin, which reduces the searching range of discrete variables. The original problem is transformed into a mixed integer linear programming sub-problem and a nonlinear programming sub-problem for alternative solution, and the number and output of generators need to be adjusted are obtained. Tests are carried out on IEEE 118- and 300-bus systems, results show that proposed control model and solution method can effectively improve the load margin of power system and reduce the adjustment number of generators in the feasible solutions, the comparison with the branch and bound method shows the rapidity and effectiveness of the proposed solution method.

**Key words:** generator output adjustment; minimum control number; static voltage stability; staged solution method; feasibility pump algorithm

(上接第 152 页 continued from page 152)

## Compounding voltage weakness indicator and reactive power optimization strategy oriented to it

LIU Qingzhen<sup>1</sup>, HUANG Junying<sup>1</sup>, WANG Shaofang<sup>2</sup>

(1. Fujian Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion, College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

**Abstract:** A new weak link determination indicator of power system is proposed and a multi-objective function reactive power optimization method oriented to system weak link analysis is proposed. The characteristics and advantages of both voltage and power aspects of the weakness indicator are fused. A new weak link compounding margin determination indicator is defined, which comprehensively describes the distance between the load normal operating point and the voltage collapse point. This indicator can be used as the determination criterion to identify the voltage weak link point set of system, which constitutes the set of nodes to be compensated for reactive power optimization. A multi-objective reactive power optimization model is established, and an improved adaptive genetic algorithm is used to replace the traditional roulette wheel method with deterministic selection principle in the algorithm selection process, and then the multi-objective reactive power optimization model is solved. Taking the IEEE 30-bus system and the New England IEEE 39-bus system as simulative testing cases, by comparing several system operation indicators and the calculative results of traditional method, the efficiency and superiority of reactive power optimization strategy according to the new weak link determination indicator is verified, as well as the high efficiency of the improved adaptive genetic algorithm in the multi-objective reactive power optimization calculation is verified.

**Key words:** weak links; compounding margin indicator; multi-objective reactive power optimization; adaptive genetic algorithm; deterministic selection principle