

基于配电网灵活性需求评估的投资方法研究

唐 娴¹, 尚明远¹, 林茵茵¹, 洪海生¹, 段 炼¹, 潘凯岩²

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510000; 2. 东方电子股份有限公司, 山东 烟台 264000)

摘要: 通过对电能质量参数进行灵活性需求评估来确定配电网的投资优先次序, 并提出了一个全新的框架。该框架包括输入数据准备、运行计算和用于量化灵活性需求, 并提出投资优先级列表的结果处理方法。应用现有配电网一部分的总线节点来证明该框架的普遍适用性。通过评估灵活性需求, 得出了一份投资优先次序表, 并确定了节点的安全供电缓冲区间与功率范围, 以进一步缓解网络约束。除了为配电网运营商提供有价值的信息外, 新提出的框架还为市场参与者计划和自我平衡投资组合和方式提供了建议。

关键词: 配电网灵活性; 需求评估; 投资方法分析

Research on investment method based on flexibility demand assessment of distribution network

TANG Xian¹, SHANG Mingyuan¹, LIN Yinyin¹, HONG Haisheng¹, DUAN Lian¹, PAN Kaiyan²

(1. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid, Co., Ltd., Guangzhou 510000, China

2. Dongfang Electronics Co., Ltd., Yantai 264000, China)

Abstract: A new framework is proposed to determine the investment priority of power distribution network through flexible demand assessment of power quality parameters. The proposed framework consists of three steps: input data preparation, run calculations, and results processing for quantifying flexibility requirements and proposing investment priority lists. In this paper, a bus node that is part of an existing distribution network is applied to prove the universal applicability of the framework. By assessing the flexibility requirements, this paper obtains a list of investment priorities and determines the safe supply buffer between nodes and the power range to further alleviate the network constraints. In addition to providing valuable information for distribution network operators, the proposed framework also provides suggestions for market participants to plan and self-balance their portfolios and approaches.

Key words: distribution network flexibility; needs assessment; analysis of investment methods

0 引言

当前, 国内配电网正在通过自动化的实现使电网的停电恢复能力和供电可靠性得到提高, 因此必须通过引入与电网元件并行的自动计量基础

设施加强其运行稳定性。配电网由配电网操作人员 (DNO) 调度中心集中配置和参数化, 并辅以通信、优化和控制过程的组合, 电能质量参数 (PQP) 必须通过自动化控制和灵活用户随时

南方电网公司管理创新项目资助 (GZHGLCX 20200004)

积极参与来保存。尽管如此，低压全控自动化操作及其可观测性仍然是最终目标，尚待实现。

由于家用可再生能源在低电压的集成度更高，因此DNO控制的资产自动化运作和参数化将会面临更高的中断概率。降低中断风险的方法之一是在对等交易的基础上，同时利用用户的灵活性平衡本地消费和发电，从而将允许的技术违规维持在PQP水平。由于配电网的自动化一般都是在中压下实现的，因此评估电压分布作为节点容纳能力的函数来分配额外的需求增加是相当困难的。因此，本文旨在提供一种普遍适用的方法，使DNO能够在发生电压或负荷违反之前确定由网络节点提供的最高需求增加。利用用户的灵活服务解决正常和异常电力系统中的局部阻塞和电压分布网络问题，是使DNO能够维持允许的PQP一个新的发展趋势。

1 基于灵活性需求评估的投资优先新框架

拟议的顺序提法可分为三个基本部分，如图1所示。第一部分，根据标准值和适用的PQPs，利用输入数据设计负荷曲线、线路的技术限制和允许的电压跌落，最终得出后处理的结果。根据以往的数据观测，包括最大负荷值和初始电压跌落，还包括潜在的新连接和未来需要考虑的需求增加。

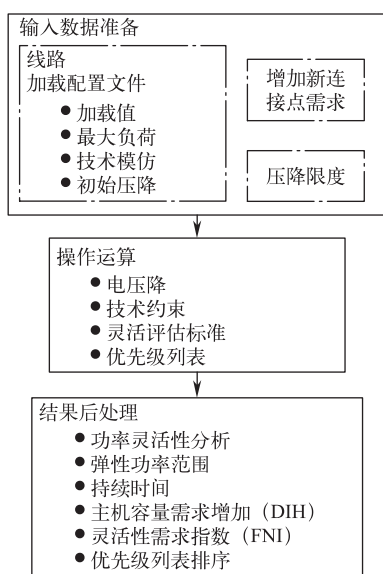


图1 提出的框架流程图

Fig. 1 Flowchart of the proposed framework

一旦准备了输入数据，就按照新应用的提议进行业务计算，以产生关于需求增加影响的结果和信息，找到安全的供应缓冲，并界定与技术违规有关的灵活性需求。该部分用于扩展FNA标准，设计节点托管能力的分配，并开发投资优先列表，以此为起点，寻找成本最低的本地柔性服务提供商。

结果后处理是提议公式的基本部分，因为它生成了对DNO有价值的主要数据。它用于确定所需的灵活性类型、功率灵活性的范围、激活的时间实例、DIH和FNI指数以及排序优先权列表。

而输入数据准备的过程包括对线路负荷进行离散域建模，并需要按照标准PQPs构造电网的技术违规约束。配电网可以是任意简单或复杂的网络或配电网的一部分。必须强调的是，负载分析不是本文的重点，但负载的离散化建模有利于更好地维持网络在允许范围内运行所需的激活时间实例。构造技术界限的部分是设定界限值的地方。

1.1 载荷剖面的离散建模

本文将离散建模方法应用于载荷剖面，以便在评估柔性需求时考虑准确的载荷随时间的依赖性。通过形成具有线路加载剖面的集合，用来作为未来功率分配需求的依据，最终的目标是利用线路加载剖面的形状（包括居民客户）和初始压降建立灵活性需求，以保持允许的技术约束。因此，指示超出限制和违反技术的负载概况通常是加强或新网络投资的优先事项。

线路加载剖面定义为时间序列集，其中每个元素对应一个定义时间实例（时间依赖）的加载值。因此， S_l 是带有整体 T 元素的第 l 行有限集，其中 $s_{l,t}$ 元素表示 t 时间实例的第 l 行加载值。 L 表示与配电站相连的线路总数；因此，可以形成整体 L 集 S_l 为

$$S_l = \{s_{l,1}, s_{l,2}, s_{l,3}, \dots, s_{l,t}, \dots, s_{l,T}\} \quad (1)$$

载荷剖面可以根据历史线路数据或实际潮流计算形成。 S_l 集合表示由低压与高压线路连接到个别变电所的最终用户负荷的集合，而负荷形状

则勾勒出最终用户在用电方面的行为。

1.2 输入数据准备

本文通过考虑电压、负荷等系统状态变量进行FNA处理。接下来，定义了确定技术违规行为的标准，从而允许随后计算灵活性概要。技术限制与线路的容量上限相关联，即 s_l^{up} 表达式为

$$s_{l,t} \leq s_l^{up} \quad (2)$$

当 dV 上升时，则

$$dV_{l,t} \leq dV^{up} \quad (3)$$

式(2)和式(3)中的技术限制必须时刻保持在允许值之内，即在PQPs的水平上。此时，必须强调的是，本文没有详细阐述电压跌落的变化，而是通过调节有功和无功功率来控制。在本文中，如式(4)所示，第 l 条线路的电压跌落，即 dV_l 只作为正常和非正常运行状态下第 l 条线路负荷剖面值的结果和函数来考虑。在确定允许的电压跌落值时，必须考虑对线路受端其他网络电压剖面的减小影响，因为电压跌落是通过增加与配电站的距离来实现的。

$$dV_{l,t} = f(s_{l,t}) \quad (4)$$

在式(4)中，假设最终用户负荷和电压通过增加与馈线点的距离线性下降。式(2)~式(4)中计算的技术限制被用作定义在允许范围内的加载值的标准，并作为确定灵活性剖面的参考点。

2 灵活性需求评估设计

2.1 新的灵活性评估标准

如式(5)所示，电压跌落 $dV_{l,t}$ 可以通过上限允许电压跌落值或者上限边际负荷值 s_l^{max} 上的 dV 上升值来表示，它对应于不施加负荷灵活性即可分配的最大功率，进一步评估负荷灵活性剖面标准。

$$\begin{aligned} s_l^{max} &= s_{l,t} \in S_l, \forall s_{l,t} : dV_{l,t} = dV^{up}; \\ \forall s_{l,t} &\leq s_l^{up} \end{aligned} \quad (5)$$

如果提交了电源连接请求，第 l 行的负荷配置文件将更改请求的值，即 $\Delta s_{l,t}$ ，这意味着必须分配额外的电源负荷，即

$$s'_{l,t} = s_{l,t} + \Delta s_l \quad (6)$$

因此，如前文式(4)所述，对应第 l 条线路

的 $dV'_{l,t}$ 的电压降也将随之变化。为了建立柔性轮廓，本文采用前/后负荷变化的方法，从允许压降的上边际负荷值 s_l^{max} （变化前）的负荷，即 $s'_{l,t}$ （变化后），得到保持压降极限所需的柔性功率或 $\Delta d_{l,t}$ 。因此，定义柔性轮廓集或 F_l 为

$$\begin{aligned} F_l &= \{ \Delta d_{l,t} = s_l^{max} - s'_{l,t} : dV'_{l,t} > dV^{up} \} \\ \forall s'_{l,t} &\leq s_l^{up} \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)定义了具有 $\Delta d_{l,t}$ 元素的集合，该元素注记了改变的负荷剖面或 s'_l 必须减小的值，以获得无电压跌落违反的运行状态。当 $s'_{l,t} = \Delta s_{l,t}$ 时，功率柔性范围确定，即

$$\Delta d_{l,t}^{max} = s_l^{max} - \Delta s_{l,t} \quad (8)$$

2.2 寻找节点需求增加托管能力的新方法

节点需求增加的容纳能力是确定允许电压跌落上限的上限边际负荷值 s_l^{max} 的结果。在分布节点级，应用第一种Kirchhoff定律，即输入功率等于输出功率，可以得到节点层面的需求增长容纳能力(DIH)应当对应于互联线 L 的最小值或者 s_l^{max} ，即

$$DIH = \min \{ s_l^{max} \} \quad (9)$$

式(9)表明，至少就DIH的值而言，额外的功率可能分配在一个网络节点，充当安全的电源缓冲。

2.3 灵活性需求作为投资优先的基础

本节指出投资可控设备意味着将用来维持电压剖面，即线路的电压跌落，并将系统变量保持在允许的PQP限值之内。这类解决方案的技术经济分析不是本文研究的主题；其主要目的是识别哪些线路处于规模的顶端，并根据灵活性需求进行优先排序，为DNO开始接受投标提供起点，进而决定是否愿意从事当地用户提供的灵活性（即能够实现同时节约成本）或投资于其重建。就线路的转移能力而言，必须指出的是，本文假定不使用FACTS元件或无功控制元件来改变线路的负荷模式，这对FNA的最终输出是有价值的。

投资优先权是在FNA的基础上，考虑式(7)中定义的 $\Delta d_{l,t}$ 值，也必须考虑 $f_{l,t}$ 系数，当该系数等于1时，则要施加灵活性分析，否则就

等于0, 即

$$f_{l,t} = \begin{cases} 1 & \Delta d_{l,t} \neq 0 \leftrightarrow \Delta d_{l,t} \in F_l \\ 0 & \text{除此之外} \end{cases} \quad (10)$$

基于灵活性的投资优先权用新提出的FNI值表示, 计算如下

$$\text{FNI}_l\% = \frac{\sum_t f_{l,t}}{T} \times 100\% \quad (11)$$

通过应用第*l*行FNI的计算值, 得到降序优先级列表, 即

$$\text{FNI}_i > \text{FNI}_j > \dots > \text{FNI}_k \quad (12)$$

FNI_i 表示在某一时间框架内反映灵活性激活需求最高值的第*i*行指数; 而 FNI_j 是第二个最高值, 直到达到*L*行的最后一行 FNI_k 。FNI指数不同, 意味着FNI值最高行由于灵活性的激活需求较高和违反技术约束, 因此可被视为投资的优先事项。式(12)中的方程可能被DNO用作规划投资进入配电网过程中需要考虑的投资优先列表。

3 数值结果

案例研究显示了新方法如何应用于配电网的现有部分, 图2为湖北省某20 kV配电网。分析时间为1年(2019年), 均用于兆瓦级提供*N*-1判据, 此配电网处的系统变量测量是自动化的, 以1 min的间隔发送给配电管理系统; 尽管如此, 虽然变电站上没有部署自动化测量设备, 但其影响的1 200个用户供给质量的技术违规行为也使其无法使用。将提出的评估和优先权方法应用于配电站的灵活性需求确定。

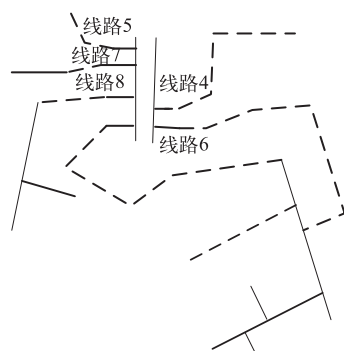


图2 湖北省某20 kV配电网带连接线示意图(电缆用虚线标示)
Fig. 2 20 kV distribution network with connection lines in Hubei Province (cables are marked with dashed lines)

表1显示了内部计算得到的初始配电网数据。

表1 配电网初始潮流、压降数据

Tab. 1 Initial power flows and voltage drop data of the distribution network

序号	$s_l^{\text{up}}/\text{MV}\cdot\text{A}$	$s_l^0/\text{MV}\cdot\text{A}$	s_l^0 (%)	dV_l^0 (%)	dV^{up} (%)
1	8.13	1.87	22.8	0.7	
2	8.03	2.45	30.6	4.3	
3	8.14	3.61	44.2	常数	
4	8.13	3.13	37.8	常数	
5	8.15	1.23	14.9	0.2	10
6	4.32	1.25	28.5	5.2	
7	8.12	0.45	5.3	4.8	
8	8.13	1.32	16.0	5.3	
9	10.01	2.43	24.8	5.5	

表中第1列表示其相关ID, 第2列是指线路的上层容量或 s_l^{up} , 而第3和4列包含初始潮流值, 第5列表示其对应的相关压降值, 第6列显示*l*-*h*线路的允许压降(10%), 以本例为准, 假定压降的值为10%。在实际运行工况中, 允许的电压降在中压的等级则为5%。

在配电线路较长且低压级各消耗点间负荷分布呈线性的情况下, 当中压级电压降为5%时, 低压级电压降将达到10%。此后的标准可根据实际综合更改转换, 并作为确定技术违规和FNA需要的标准。如表1所示, 线路9(10.01 MV·A)的容量最高, 而线路6(4.32 MV·A)的容量最低。在此配电网中, 本文假设线路4、5的压降为常数且在极限范围内(供电线路), 初始潮流与线路容量的比值在线路2上最高, 为28.6%, 而在线路3上最低, 为5.4%。初始潮流的压降在线路9最高(5.5%), 在线路7最低(4.8%)。

在案例研究的第一步中, 应用式(1)形成负荷剖面集, 即 S_1 、 S_2 ... S_4 , 应用式(4)~式(7)评估额外需求1.9 MV·A分配所需节点的承载能力和保存允许PQP所需的柔性剖面。并设定允许的10%偏离的PQPs被认为是常数, 不依赖于数据分辨率。

因此，确定了可在此配电网分配的额外功率而不施加灵活性，其线路8价值为1.1 MV·A，也代表了式（9）中定义的DIH，由于需求增加为1.9 MV·A，因此需要对其施加灵活性分析，范围如表2的第3栏所示。线路6的负荷满足1.2 MV·A的允许电压跌落，为了满足1.9 MV·A的需求增加要求，需要在0~0.6 MV·A（负方向）范围内灵活加载，从而保持PQP的允许电压跌落。线路8可能由附加1.1 MV·A加载，在0~0.8 MV·A范围内柔性；线路9可能由附加1.7 MV·A加载，在0~0.1 MV·A范围内柔性。对线路8（0.7 MV·A）求出最高的 $\Delta d_{l,t}^{\max}$ ，而对线路9行（0.2 MV·A）求出最低值。线路7可以在不施加灵活性的情况下分配额外的加载请求，因为它具有正的灵活性范围（0.2 MV·A）。

表2 灵活性的评估结果

Tab. 2 Flexibility assessment results

线路编号	$s_l^{\max}$ /MV·A	$\Delta d_{l,t}^{\max} \in F_l$ /MV·A	$\Delta d_{l,t} \in F_l$ /MV·A	FNI _l (%)
6	1.2	-0.5	-0.2	57
7	2.2	0.2	-	-
8	1.1	-0.7	-0.4	70.5
9	1.7	-0.2	-0.04	0.3

通过一年的观测，可知功率柔性范围内的活化柔性功率 $\Delta d_{l,t}$ 的平均值如表2第4列所示。线路9（0.04 MV·A）的功率柔性激活均值变化值最低，其次是线路6（0.2 MV·A）和线路8（0.4 MV·A）。如式（10），表2第5列显示了灵活性的时间持续时间，即灵活性需求。线路8的FNI值表明，在长达一年的观测期内，必须在70.5%的时间内使用加载灵活性，即在0~0.8 MV·A范围内功率下降。这与线路6的FNI值对比，在57%的时间内必须施加加载柔性。对于线路9，加载灵活性只能在观察期间的0.3%内应用。图3展示了线路6的负荷剖面、造成违反的电压跌落限制以及为适应增加的负荷而应采用的灵活性剖面的示例，这些剖面为1.9 MV·A。

FNI_l指标可以根据技术违规约束、需要分配的额外功率和应用灵活性来确定，按照降序优先

排列线路。根据式（12），配电网优先投资列表如表3所示。

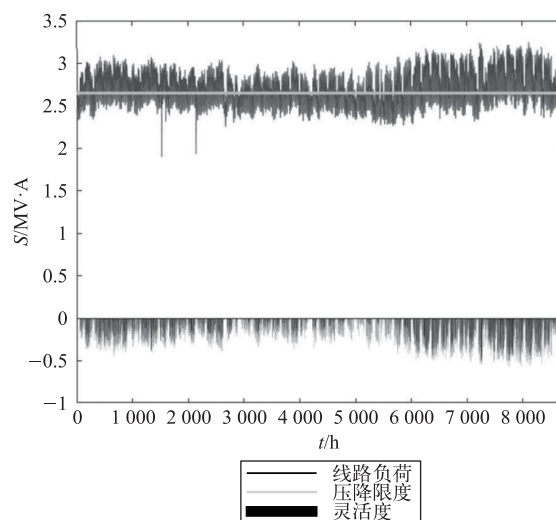


图3 线路6的负载曲线和功率灵活度

Fig. 3 Loading profile and power flexibility activation of line 6

表3 基于FNI的投资优先级列表

Tab. 3 FNI-based investment prioritisation list

线路编号	FNI _l (%)
8	70.5
6	57
9	0.3
7	-

从表3可以看出，由于灵活性需要在分析期内70.5%的时间内应用，所以线路8应在优先投资候选名单的首位，以便整合个别元素或方法，使电压维持在1（pu），执行VAR优化，容纳额外的需求增加请求。

这种优先事项清单可以帮助DNO采取第一步，通过在现有情况下实行灵活性，解决与PQP有关的地方问题，并允许它们由于灵活性提供者的成本效率而推迟投资。因此，该清单是DNO首先确定线路顺序的宝贵工具，它证明最偏离所需的PQP，并在可能的情况下，与立即投资相比，选择灵活性作为更具成本效益的解决办法，从而推迟投资于网络扩展。

4 结束语

针对配电网灵活性需求评估投资的问题，

本文在FNA的基础上提出了一个新的投资优先框架，作为网络扩展规划过程的重要组成部分，它将为进一步探索寻找成本效益高的解决方案——延迟投资，让用户在低成本的情况下提供本地灵活性设计，为投资于网络的重建/加固奠定了基础。同时本文采用配电网的负荷和电压剖面约束法，提出了通过框架确定限值保持在供电质量标准范围内所需的功率范围和时间实例，即PQP。其具体实施方式和主要结论如下：

1) 第一步，采用离散的公式方法对线路的负荷剖面进行建模，通过引入DIH指数建立网络节点的最高需求增长。该索引针对网络节点中可能分配的功率，并作为安全的电源缓冲。所提框架中集成的判据显然对网络运营商有价值，因为它们包括了电压剖面、线路传输容量和负荷。所进行的灵活性评估产生了权力灵活性的范围及其持续时间，并提到了灵活性激活的需要。最后利用灵活性评估结果，在激活需求的基础上，拟定优先级列表。降序列表表明，排名靠前的投资候选人具有最高的激活需求，即在电源灵活性范围内最频繁的激活功率下降。结果表明了该框架的应用及其对其他配电网或其部分的普遍适用性。

2) 本文进行了案例研究，以确定湖北省某配电网现有部分的一个节点的最高需求增加，计算灵活性激活需求（电源灵活性范围和持续时间），并设计投资优先清单。这种优先安排对于网络运营商来说是至关重要的，因为它使它们能够将投资和网络扩张计划调整到一般有限的预算和限制中，以使其具备可利用的灵活性。

3) 此外，由于优先清单是灵活市场和所有参与者的基础，包括例如聚合商、能源提供商和竞标者等，因此这些参与者可以利用平衡集团和客户组合来增加收入。因此本文今后的研究将更全面地介绍将经济观点纳入投资优先事项清单的机会，并通过向投资候选人分配适当的权重来进行优化投资。**EA**

参考文献

- [1] YIN S A, LU C N. Distribution feeder scheduling considering variable load profile and outage costs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 652-660.
- [2] ZHAO J H, FOSTER J, DONG Z Y, et al. Flexible transmission network planning considering distributed generation impacts [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 26(3): 1434-1443.
- [3] 边晓燕, 孙明琦, 董璐, 等. 计及灵活性聚合功率的源-荷分布式协调调度[J/OL]. 电力系统自动化: 1-14[2021-09-04].
- [4] 俞拙非, 刘菲, 刘瑞环, 等. 面向配电网弹性提升的源网荷灵活资源优化研究综述及展望[J/OL]. 中国电力: 1-14[2021-09-04].
- [5] 马丽, 王宗礼, 刘伟, 等. 考虑运行灵活性的智能配电网多层优化规划[J]. 电力建设, 2018, 39(6): 71-79.
- [6] 叶滨. 考虑运行灵活性的智能配电网多层优化规划[J]. 建材与装饰, 2018(47): 206-207.
- [7] 温丰瑞, 李华强, 温翔宇, 等. 主动配电网中计及灵活性不足风险的储能优化配置[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3952-3962.
- [8] 程亮, 黄河, 朱磊, 等. 交直流配电网的交换功率灵活性提升方法研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(4): 10-17.

作者简介



唐 嫻

唐嫻（1987—），女，工程师，主要从事配电网规划及企业运营监控工作。

（收稿日期：2021-09-12）