

面向配电网弹性提升的需求响应优化配置策略

李志浩¹, 赵波¹, 林达¹, 倪筹帷¹, 秦清², 韩蓓², 李国杰²

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310000;

2. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 社会和经济的发展对电力系统供电质量提出更高的要求, 尤其是与用户相连的配电网易受扰动影响, 需加强其供能弹性。随着智能电网技术的发展, 通过优化资源配置、灵活调度需求响应资源, 可以提高电网供能弹性。采用基于力学映射模型的多阶段弹性评估模型量化需求响应的优化配置对配电网弹性的提升效果, 并通过遗传算法求解该非线性优化问题。最后, 以IEEE 33节点系统为例验证该模型在需求响应配置问题中的合理性和有效性, 并分析优化配置方案对配电网弹性的提升效果。

关键词: 配电网; 弹性; 弹性力学映射; 需求响应; 优化配置策略; 遗传算法

中图分类号: TM 727

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202204052

0 引言

随着飓风、地震、洪水等灾害频繁发生, 电力系统运行的不确定性、开放性和复杂性逐渐增加, 电网的持续稳定供电面临着前所未有的挑战^[1]。近年来, 合理评估和提升配电网的弹性已成为许多国家的当务之急^[2]。

电网的弹性可衡量系统应对外界扰动的反应能力, 目前衡量指标主要依赖于历史数据或对运行状态模拟的统计模型^[3]。在配电网调度中, 提高电力系统弹性的措施主要集中于扰动前的预防措施和扰动后的恢复措施^[4-5]。由于控制中心很难获得实时运行数据并在发生干扰时立即采取措施, 因此系统需要根据自身的特性和运行状态进行防御和恢复。文献[6]提出需求响应DR(Demand Response)可以提升电网运行弹性, 文献[7]提出综合柔性负荷响应可以提升电力和热力需求弹性。

需求响应指用户侧通过改变原有习惯的用电模式来响应价格信号或激励机制^[8-9]。根据用户不同响应方式, 需求响应可以分为价格型需求响应和激励型需求响应2类^[10]。价格型需求响应通过价格信号引导客户调整用电, 达到削峰填谷的目的; 激励型需求响应通过经济补偿或优惠政策激励用户参与电力系统所需的负荷调整^[11]。当供需不平衡时, 激励

型需求响应可以通过用户用电行为的调整减小影响范围。有效的供电恢复是提升弹性的方法之一, 配置于配电网的需求响应与该方法一致, 因此可以利用其在电网容量紧缺或故障后供电恢复过程中所发挥的作用来提高电力系统恢复能力, 从而增强配电网的弹性^[11]。同时, 需求响应的配置方案也极大地影响弹性提升的效果。因此, 本文提出面向弹性提升的需求响应优化配置方案, 旨在最大限度地增强配电网弹性^[12]。文献[13-18]已对需求响应资源规划和优化配置展开了相关研究。文献[13]基于条件风险理论, 建立需求响应规划模型以实现利润最大化和风险最小化。文献[14]引入激励型需求响应措施, 对多区域综合能源系统进行协同规划, 并采用Benders分解算法进行求解。文献[15]建立价格型需求响应参与的电网优化配置模型。文献[16]以最小化成本为目标求解电源规划问题, 并结合峰谷平分时电价和可中断负荷2种需求响应进行求解。文献[17]对基于需求响应的区域微电网成本效益进行分析。文献[18]将供应侧与需求侧的资源整合进行规划, 实现源-网-荷-储-需求响应协调优化和社会总成本最小。

与输电网相比, 配电网与负荷紧密相连, 同时配电网应对干扰的能力较弱, 且网络的复杂性增加了弹性研究的难度。因此, 对配电网弹性进行合理评估可以有效地减少停电范围, 对安全、经济、环境和社会具有重要意义。不同于弹性研究中基于概率或者运行状态模拟的统计模型, 本文采用基于力学映射的电网机理模型, 通过电网的等效弹性系数来评估配电网弹性。通过前期研究可知, 供电恢复阶段对系统弹性提升有较大影响, 且目前尚未有针对需求响应对电网弹性作用的研究, 因此本文根据需求响应对电网的调控作用进行模型等效。当电网容量短缺或发生故障时, 可以通过实施激励型需求响应,

收稿日期: 2021-09-02; 修回日期: 2021-11-30

在线出版日期: 2022-04-18

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(用户侧可控资源聚合效能提升与网荷互动技术研究与应用)(5211DS20008J)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. (Research and Application of User-side Adjustable Resource Aggregation Efficiency Improvement and Network Load Interaction Technology)(5211DS20008J)

用户调整用电行为来削减负荷,实现电网的供需平衡,缩短恢复供电所需的时间,并减少故障影响的范围,体现在弹簧模型上即为该弹簧的弹性形变减少,需求响应的作用将有利于配电网弹性的提升。本文将需求响应的安装位置和容量作为优化变量,并通过改进遗传算法进行优化求解,以实现配电网弹性提升效果的最大化。

1 问题构建

通过电网潮流方程和物理弹簧胡克定律形式的相似性,将电力系统和弹簧系统进行映射。借鉴弹簧弹性系数的物理意义,定义电网的等效弹性系数来衡量电网应对外界扰动的反应能力,并对弹性核心特征对应的系数进行计算得到弹性指标。根据需求响应对电网的调控作用,将其进行同类弹簧等效。根据弹性的多阶段特性,可以预先考虑所有 $N-1$ 故障情况来计算基于力学映射的电网弹性 ε (具体计算过程见第2节)。本文模型采用可中断负荷作为一种可以快速并积极响应的需求响应措施,以提高发电容量充裕度,降低系统峰荷,缓解系统阻塞等。在固定需求响应配置总容量,即此时投资成本已固定的情况下,对可中断负荷进行建模分析和优化配置。在算例分析中,给定固定的需求响应总容量时,聚合商调度用户侧可调负荷的成本 $C_{\text{cost}}(i)$ 已经可以确定,可表示为:

$$C_{\text{cost}}(i)=c(i)P(i)$$

式中: $c(i)$ 为第 i 类单位可调负荷的响应价格; $P(i)$ 为第 i 类单位可调负荷容量。在实际规划问题中,可根据给定的成本进行配置方案选择。

本文以计及需求响应的配电网弹性最大为目标函数,即:

$$\max f(x) \quad (1)$$

式中: x 为需求响应位置和容量的集合, $f(x)$ 为该需求响应配置方案对应的配电网弹性。

1) 系统潮流约束。

采用直角坐标形式表示系统潮流约束如下:

$$P_i=e_i \sum_{j \in N(i)} (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i \sum_{j \in N(i)} (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) \quad (2)$$

$$Q_i=f_i \sum_{j \in N(i)} (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - e_i \sum_{j \in N(i)} (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) \quad (3)$$

$$e_i^2 + f_i^2 = U_i^2 \quad (4)$$

式中: $N(i)$ 表示连接到节点 i 的节点集合; e_i 、 e_j 和 f_i 、 f_j 分别为节点 i 、节点 j 电压的实部和虚部; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为支路 ij 的电导和电纳; P_i 和 Q_i 分别为节点 i 注入的有功功率和无功功率。

2) 系统安全约束。

$$U_{\min} < U_i < U_{\max} \quad (5)$$

$$I_{ij}^2 < I_{ij\max}^2 \quad (6)$$

式中: $U_{i\min}$ 和 $U_{i\max}$ 分别为节点 i 电压的下限和上限; I_{ij} 为流过支路 ij 的电流; $I_{ij\max}$ 为流过支路 ij 的电流上限。

3) 需求响应量约束。

$$0 \leq P_{\text{DR}(i)} \leq P_{L(i)} \quad (7)$$

式中: $P_{\text{DR}(i)}$ 为节点 i 处的需求响应量; $P_{L(i)}$ 为节点 i 处用户响应前的负荷量。

2 计及需求响应的配电网弹性量化

2.1 电力系统弹性映射模型

根据弹性力学中的胡克定律,弹性支路受力和形变之间的关系由弹簧的弹性系数衡量。基于静态潮流方程式(8)和式(9),考虑力的大小和方向,可以将网络分支映射为两自由度弹性分支^[19-20]。

$$P_{ij} + jQ_{ij} = (e_i + jf_i) \frac{U_x + jU_y}{r_{ij} + jx_{ij}} \quad (8)$$

$$S_{ij} = \frac{U_i |\Delta U_{ij}|}{z_{ij}} = \frac{U_i \sqrt{U_x^2 + U_y^2}}{z_{ij}} \quad (9)$$

式中: P_{ij} 、 Q_{ij} 分别为流过支路 ij 的有功功率和无功功率; r_{ij} 、 x_{ij} 、 z_{ij} 分别为支路 ij 的电阻、电抗和阻抗; U_x ($U_x = e_i - e_j$)为电压降 ΔU_{ij} ($\Delta U_{ij} = U_i - U_j$)在 x 方向上的分量; U_y ($U_y = f_i - f_j$)为电压降 ΔU_{ij} 在 y 方向上的分量; S_{ij} 为支路 ij 的视在功率,将其在电压 x 和 y 方向上分解成 S_x 和 S_y ,如式(10)所示。

$$S_{ij}^2 = S_x^2 + S_y^2 \quad (10)$$

根据如下类比将电力系统映射到弹性弹簧系统中:

$$\text{在 } x \text{ 方向上有 } \begin{cases} S_x \leftrightarrow F_x \\ U_x \leftrightarrow \Delta x \end{cases}, \text{ 在 } y \text{ 方向上有 } \begin{cases} S_y \leftrightarrow F_y \\ U_y \leftrightarrow \Delta y \end{cases}$$

等效分支模型如附录A图A1所示,电气支路可以等效成在电压降方向受力的弹簧支路。图中: F_{eq} 由相应分支的视在功率 S_{ij} 映射而来; F_p 和 F_q 分别对应于相应支路的有功功率和无功功率。电力系统的节点和支路分别对应于弹性网络模型中的节点和支路。每个节点的位置由电压的幅度和相角确定,并分布在电压矢量的 xy 坐标系中。电路的串并联结构对应的映射结构保持不变,对应于弹簧支路的串并联^[19]。

在弹性力学中,弹簧形变产生的弹性势能是力对位移的积分,据此映射而来可计算两自由度弹簧的弹性势能 E_1 ,如式(11)所示。

$$E_1 = \int F_x d\Delta x + \int F_y d\Delta y \quad (11)$$

每个等效弹簧支路的力的方向不同。为了实现从分支到网络的拓扑映射,根据式(10)描述的力的合成和分解,将力分解到 x 和 y 方向上,根据式(12)

定义的两自由度的弹簧分支的映射弹性势能进行计算。

$$E_{ij} = \int S_x dU_x + \int S_y dU_y \quad (12)$$

式中: E_{ij} 为两自由度的弹簧分支 ij 的映射弹性势能。

假设弹性网络由 n 个分支组成, 则总势能满足线性叠加特性, 而与分支上力的方向无关, 这也适用于映射电力系统的弹性势能。系统的弹性势能 $E_{1\Sigma}$ 可以写为:

$$E_{1\Sigma} = \sum E_{ij} \quad (13)$$

在不同的等效弹簧支路中, 不同方向上的力不能直接叠加合力。因此, 首先将每个分支在 x 和 y 方向上的分力分别叠加, 然后合并以获得电力系统的等效受力。计算电力系统的等效弹性系数的步骤如下。

首先, 计算弹性的总势能 $E_{1\Sigma}$ 。

然后, 计算式(14)所示的合力 F_{eq} 。

$$F_{eq} = \sqrt{\left(\sum F_{xij}\right)^2 + \left(\sum F_{yij}\right)^2} = \sqrt{\left(\sum S_{xij}\right)^2 + \left(\sum S_{yij}\right)^2} \quad (14)$$

式中: F_{xij} 、 F_{yij} 分别为支路 ij 在 x 、 y 方向上的等效受力; S_{xij} 、 S_{yij} 分别为支路 ij 在 x 、 y 方向上的等效视在功率。

最后, 根据式(15)构造电力系统的等效弹性系数 k_{eq} 。

$$k_{eq} = \frac{F_{eq}^2}{2E_{1\Sigma}} \quad (15)$$

本文的弹性模型为了实现从支路到网络的拓扑映射, 将每条支路分解到电压矢量的 xy 坐标系下进行分解和合成。因此该种力的分解合成的计算方法也适用于配电系统分散的负荷结构, 首先将每一小段线路进行弹簧等效, 最后将所有的弹簧受力进行分解和合成。但是由于配电网的支路长度较长, 范围较广, 如果直接将每一小段支路和负荷进行直接等效, 计算较为复杂, 因此这种力学模型更适用于简化后的支路结构。后期将结合实际情况进行进一步的模型分析和优化, 使模型更具有实用价值。

2.2 需求响应建模

大部分电力终端用户都可以提供需求响应, 但其需求响应潜力不尽相同。部分用户提供需求响应成本过高, 与预期收益不符。若采用分布式电源或者储能等其他方式在故障或供需失衡的情况下供电, 也可以实现其目标, 然而目前他们的投资及运行成本都较高, 经济性较差。

电力用户对激励机制做出响应, 暂时改变原有用电模式, 减少或转移某时段用电负荷需求, 改善系统的恢复能力, 从而保证故障后系统供电水平。激

励型需求响应的投资及运行成本很低, 主要成本为给用户的经济补偿, 若其为可中断负荷项目, 则其安装成本为 0, 是提高配电网弹性具有较高经济性的方法。因此在系统过负荷状态或者遭遇故障的情况下, 通过电力公司向激励型需求响应发出信号可以迅速做出响应, 保障电网对缺电区域进行供电, 维持系统较高的供电水平。

需求响应主要分为削峰需求响应以及填谷需求响应, 其中削峰需求响应又可分为日前响应、小时级响应、分钟级响应和秒级响应。本文构建的弹性指标由系统的正常运行状态和故障后状态的瞬时弹性系数组成, 而瞬时弹性系数由该时刻的潮流分布和网络参数计算而得, 重点衡量需求响应对弹性的提升作用, 可以不区分需求响应资源的差异化特征。基于对需求响应和弹性指标时间尺度的分析, 为了提高配电网的弹性, 本文聚焦于提升配电网的恢复能力, 因此主要关注秒级削峰需求响应。而可中断负荷作为一种可以快速并积极响应的需求响应措施, 其可以提高发电容量充裕度, 降低系统峰荷, 缓解系统阻塞等, 因此对可中断负荷类型进行建模分析和配置优化。

在基于力学映射的弹性建模中, 将需求响应等效为作用在负荷节点 i 的弹簧需求响应, 且受力为与节点处受拉力方向相反的推力, 见图 1。系统过负荷或发生故障时, 在需求响应的作用下, 电网的电压降落以及功率分配都会得到相应改善, 为部分失电区域恢复供电, 体现在弹簧模型上即为该弹簧的弹性形变减少。需求响应的作用将有利于配电网弹性的提升。

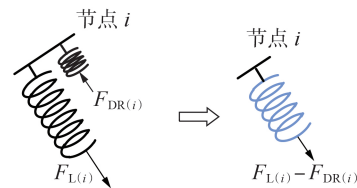


图 1 需求响应等效模型

Fig.1 Equivalent model of DR

需求响应约束为负荷点的响应量不超过该点的实际负荷量, 该极限情况对应到弹性模型中为弹簧需求响应受力 $F_{DR(i)\max}$, 等效弹簧不受力。由于可中断负荷是建立在原负荷资源的基础上的, 因此不可超过该极限, 见图 2。

计及需求响应时电网的等效弹性系数 k'_{eq} 的计算公式见式(16)。

$$k'_{eq} = \frac{F_{eq}}{x_{eq}} \quad (16)$$

式中: x_{eq} 为等效形变。

当负荷过载或系统发生故障时, 系统需切除部

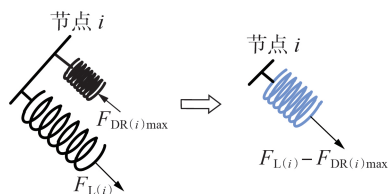


图2 需求响应约束等效模型

Fig.2 Equivalent model of DR constraint

分负荷来维持其他用户的供电水平,由于需求响应可等效于供电作用,使得系统在恢复电压水平即恢复弹簧形变中,对应的 k_{eq} 较小。而在相同受力下,弹性系数越大,形变越小,对应的弹簧弹性越大;反之,弹性系数越小,形变越大,越易形变,即系统越易恢复。因此较小的 k_{eq} 代表系统具备较好的恢复能力,对应到弹性评估中即具备较强的弹性。

2.3 含需求响应的电网弹性多阶段评估

弹簧的弹性系数是衡量弹簧形变后恢复能力的指标^[19],可用于比较不同弹簧的弹性大小。根据其物理意义,定义的等效弹性系数反映了电网在弹性评估过程中对外部干扰的反应能力^[19]。在正常情况下,它可以衡量电力系统抵抗干扰的能力,在电力恢复过程中,它可以作为判断恢复能力的指标。这2个特征是弹性电力系统定义过程中的主要特性。

电力系统响应扰动的多阶段过程^[1]类似于具有初始变形的弹簧在扰动后恢复全部或部分变形的过程。整个过程可分为5个阶段,即准备、抵抗、响应、恢复和最终运行阶段^[1]。

根据前期的研究^[19-20],等效弹性模型的形变量代表系统的电压水平,并且弹簧的受力对应于不同阶段的负载水平。不同阶段下的弹性系数可用于衡量电力系统对扰动事件的响应能力。

准备阶段为遭受扰动或故障前系统正常运行状态,对应为未受外力扰动的弹簧系统。抵抗阶段为抵御扰动阶段,对应为在外力影响下弹簧系统形变。在受到等效拉力的扰动作用时,为保证形变范围不超过弹簧安全界限,需减少自身负荷。在抵御扰动的过程中,电网应有较强的鲁棒性抵抗扰动,用准备阶段代表抗扰动能力的等效弹性系数 k_0 衡量系统抵御能力。响应阶段为遭受扰动后的系统恢复阶段,对应为弹簧恢复形变过程。恢复阶段为扰动事件发生后系统进行恢复的阶段,当补充部分恢复力后,系统可以适当增加负荷拉力进行恢复。在供电恢复阶段,电网需有足够的充裕性和恢复能力以面对扰动场景,减少供电损失。用系统在响应阶段代表响应恢复能力的等效弹性系数 k_1 充当恢复能力的指标。

考虑到系统对极端事件的响应及其恢复能力,根据式(17)定义多阶段弹性评估的指标。可以根据正常条件下的潮流来计算 k_0 。

$$\varepsilon = \frac{k_0}{k_{1-ave}} (k_0 - k_{1-ave}) \quad (17)$$

$$k_{1-ave} = \frac{\sum_{i \in F} k_i}{N-1} \quad (18)$$

式中: k_i 为不同故障场景 i 下电力系统在响应阶段的弹性系数,下标 i 表示支路 i 故障,是 $N-1$ 个故障集中的一种场景; k_{1-ave} 为所有 $N-1$ 次故障下系统在响应阶段的平均等效弹性系数,可用于衡量系统的平均恢复能力; F 为故障支路集合。 k_0 值越大,代表电力系统更稳定并具有更强维持供电的能力^[19]; k_{1-ave} 值越小,代表电力系统具有更好的恢复能力。

由于需求响应主要影响故障或负荷过载后的电网供电状态,因此计及需求响应的配电网弹性计算只需修改 k_{1-ave} 部分。当系统负荷过载或发生故障时,在需求响应的作用下,电网的电压降落及功率分配得到相应改善,根据调整过的潮流分布,按照式(8)~(15)计算此时的等效弹性系数 k_{eq} ,在所有 $N-1$ 次故障下计算 k_{1-ave} ,最终得到 ε 。

3 算例分析

面向电网弹性提升的优化模型是一个混合整数非线性问题,其中容量和位置变量均为整数值,而其他变量(例如电压和潮流)为给定范围内的任意值。目标函数形式较为复杂,无法进行凸优化处理,因此采用启发式算法进行求解。为了求解该模型,采用改进遗传算法求解需求响应的配置方案,具体求解步骤如下。编码:将决策变量编码为染色体,其中包含需求响应的配置位置和容量信息。整数变量的长度由安装候选位置确定。候选位置上的数字代表安装在相应位置的需求响应的容量。如果特定位置的数字为0,则此位置没有需求响应。整数变量可以同时确定安装容量和位置。选择:为了确保当前组中最佳个体的适应度不低于上一代,具有较高适应度的个体将替换相同数量的适应度较低的个体。重组:基于统一的交叉算子和重组概率交换2个随机个体在同一位置的容量。突变:若介于0~1之间的任意数字小于突变概率,则交换个体中任意2个需求响应位置的容量。

需求响应资源种类丰富,包括电动汽车、空调负荷、光伏发电、储能资源等,用户侧可以对这些资源进行灵活配置。但是根据不同节点需求响应的容量,电网给予用户不同的激励政策引导用户配置的具体方案,以实现需求响应弹性提升作用的最大化。可中断负荷指在紧急情况或负荷高峰期时,通过电力公司向签订协议的用户发出削减或中断负荷的信号,这是处理紧急情况的重要方法,具有响应速度快、无安装成本的优势。其实施方式主要以合同的方式开展。用户根据生产用电计划提交合同信

息,基本内容包括中断电量的大小和补偿价格。在签订合同后,配置方案即是在确定的总容量下进行的,因此本文算例在确定需求响应总容量的前提下,研究配置位置和容量的问题。主要对可中断负荷进行分析,根据系统原负荷位置,考虑需求响应的可配置位置及规划容量,以期最大限度提高配电网弹性。选择遗传算法解决优化配置问题,从候选位置和给定总容量中分配需求响应,将弹性值与其他方案进行比较,再进行迭代,直到目标函数达到最佳结果为止。

本节在IEEE 33节点系统上验证所提计及需求响应优化配置策略的有效性和合理性。IEEE 33节点系统结构见附录A图A2,其额定电压为12.66 kV。本文需求响应优化配置主要在3个负荷分区进行,3个分区负荷签订相同的响应激励政策,同一分区负荷同时进行响应。

3.1 模型合理性验证

首先对计及需求响应的多阶段弹性指标的合理性进行验证,并在此基础上验证需求响应配置对弹性的提升作用。为使弹性提升效果明显,将系统负荷水平提高至原来的3倍。本文算例中需求响应优化配置规定总容量为1080 kW,配置单位容量为10 kW。根据上文分析,在负荷过载或紧急情况下,配置需求响应可以快速响应其他区域的负荷需求,保证系统的供能水平。因此是否配置需求响应的系统在紧急响应前的状态相同,即系统抵御干扰的能力相同,在力学映射模型中对应为准备阶段的等效弹性系数 k_0 相同。在配置需求响应策略问题中着重分析响应阶段的等效弹性系数 k_{1-ave} 与弹性指标 ε 的关系,以及需求响应配置前后系统弹性的提升效果。从所有规划方案中随机选取12种场景,比较其等效弹性系数 k_{1-ave} 、 ε ,并将这些场景下计算得到的弹性指标与未配置需求响应的规划方案的弹性指标进行比较,计算得到这些场景下弹性指标的提升效果,不同场景下的指标值如图3所示,图中 k_{1-ave} 、 ε 均为标么值。

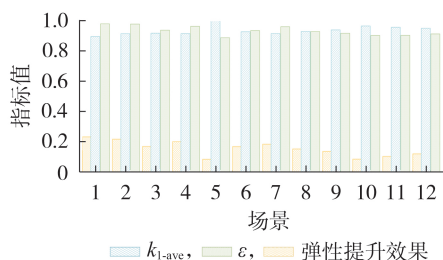


图3 不同场景下的指标值

Fig.3 Indicator values under different scenes

从图3中可知:较低的等效弹性系数 k_{1-ave} 对应较高的弹性指标,这与力学映射模型中 k_{1-ave} 和系统

弹性指标 ε 的关系相一致;随机选取的配置场景与未配置需求响应的方案相比,弹性均达到了一定的提升效果,且根据需求响应对系统供能恢复阶段的不同作用,不同的配置场景对应不同的弹性提升效果,较低的等效弹性系数 k_{1-ave} 、较高的弹性指标 ε 同时对应较高的弹性提升效果。

根据图3,多阶段弹性评估模型在以提升恢复供电为主的弹性评估情况下可以较好地反映恢复效果对弹性指标的影响。同时,也可以有效表现需求响应配置对系统弹性指标的提升作用。

3.2 算法合理性验证

针对算法合理性验证,分别对未考虑负荷分级系统和考虑负荷分级系统进行优化配置,分析并比较其优化结果。选择未配置需求响应的系统计算弹性指标作为初始值,算法迭代情况如图4所示,在该场景中对应的最优配置方案为在节点12—16对应的负荷区域配置该区负荷水平的70%作为需求响应资源,在节点31—32对应的负荷区域配置该区负荷水平的30%作为需求响应。将最优方案与初次迭代的弹性指标进行比较,可知需求响应配置将弹性提升了9.375%。

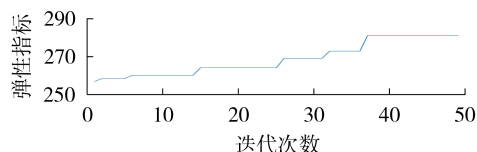


图4 不计及负荷分区的适应度曲线

Fig.4 Fitness curve without considering load zone

电力网络中负荷根据中断供电导致的实际影响程度可分类为一级、二级和三级负荷。一级负荷指中断供电会带来重大损失的负荷,二级负荷指中断供电会带来较大损失、影响正常用电的负荷,除一、二级负荷外为三级负荷。本文分别设定节点31、32处的负荷为一级负荷、节点19—22处的负荷为二级负荷、节点12—16处的负荷为三级负荷。考虑可中断负荷分级情况下,对系统需求响应进行优化配置。

当电力网络处于正常负荷水平时,需求响应配置规定总容量为360 kW,配置单位容量为10 kW。同样将未配置需求响应的系统作为初次迭代方案,迭代情况见图5。其中最优配置方案为三级负荷区域配置该区负荷水平的90%作为可响应资源,一级

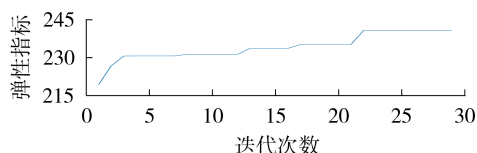


图5 计及负荷分区的适应度曲线

Fig.5 Fitness curve considering load zone

负荷区域配置该区负荷水平的10%作为可响应资源,该种配置方案与初次迭代方案相比弹性效果提升了9.524%。

将2种情况的配置方案进行对比,可发现均未对节点19—22对应的负荷区域进行需求响应配置,计及节点31、32对应的负荷区域的响应成本后,其配置比例降低至10%。3个负荷分区对应的负荷总量相同,但其分布位置不同。节点12—16对应的负荷分区1处于支路中端,且负荷分布分散;节点19—22对应的负荷分区2处于支路末端,负荷分布较为分散;节点31、32对应的负荷分区3处于支路中末端,负荷分布较为集中。根据不同的最优配置方案可知,末端负荷分区对弹性提升作用较小,处于支路中段且负荷分布较为分散的区域可以辐射到较多负荷点,也更宜配置需求响应资源。

4 结论

本文为了最大化需求响应优化配置对弹性的提升作用,提出了优化模型并采用遗传算法进行求解。基于力学映射的弹性评估模型可在抗干扰过程中衡量电力系统多阶段特征,并量化需求响应在系统发生负荷过载或故障后对系统供能恢复的作用,因此采用该弹性映射模型来评估需求响应优化配置对提升供能弹性的效果。基于IEEE 33节点系统将不同场景下的弹性指标与需求响应发挥作用的供能阶段的等效弹性系数进行对比,量化需求响应对弹性的提升效果,验证了考虑需求响应模型的合理性和有效性,并结合计及负荷分区系统的优化配置策略分析不同方案对弹性提升的影响。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 别朝红,林雁翎,邱爱慈. 弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(22):1-9.
BIE Zhaohong, LIN Yanling, QIU Aici. Concept and research prospects of power system resilience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 1-9.
- [2] 别朝红,林超凡,李更丰,等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J]. 中国电机工程学报,2020,40(9):2735-2745.
BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2745.
- [3] LI R, WONG P, WANG K, et al. Power quality enhancement and engineering application with high permeability distributed photovoltaic access to low-voltage distribution networks in Australia[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(3): 183-189.
- [4] 高海翔,陈颖,黄少伟,等. 配电网韧性及其相关研究进展[J]. 电力系统自动化,2015,39(23):1-8.
GAO Haixiang, CHEN Ying, HUANG Shaowei, et al. Distribution systems resilience: an overview of research progress[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 1-8.
- [5] 陈碧云,李翠珍,覃鸿,等. 考虑网架重构和灾区复电过程的配电网抗台风韧性评估[J]. 电力系统自动化,2018,42(6):47-52.
CHEN Biyun, LI Cuizhen, QIN Hong, et al. Evaluation of typhoon resilience of distribution network considering grid reconstruction and disaster recovery[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 47-52.
- [6] 尹逊虎,丁一,惠红勋,等. 初期现货市场下考虑用户响应行为的需求响应机制设计[J]. 电力系统自动化,2021,45(23):94-103.
YIN Xunhu, DING Yi, HUI Hongxun, et al. Design of demand response mechanism considering response behaviors of customers in initial electricity spot market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 94-103.
- [7] 鞠文韬,崔承刚,杨锦成,等. 考虑柔性负荷响应的综合能源系统多尺度优化调度研究[J]. 浙江电力,2020,39(12):12-19.
JU Wentao, CUI Chenggang, YANG Jincheng, et al. Research on multi-scale optimal scheduling of integrated energy system considering flexible load response[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(12): 12-19.
- [8] 田世明,王蓓蓓,张晶. 智能电网条件下的需求响应关键技术[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3576-3589.
TIAN Shiming, WANG Beibei, ZHANG Jing. Key technologies for demand response in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3576-3589.
- [9] 杨景旭,李钦豪,张勇军,等. 考虑电网需求匹配度的多EV聚合商需求响应削峰优化建模[J]. 电力自动化设备,2021,41(8):125-134.
YANG Jingxu, LI Qin hao, ZHANG Yongjun, et al. Peak shaving optimization modeling for demand response of multiple EV aggregators considering matching degree of power grid demand[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 125-134.
- [10] 牛文娟,李扬,王蓓蓓. 考虑不确定性的需求响应虚拟电厂建模[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3630-3637.
NIU Wenjuan, LI Yang, WANG Beibei. Demand response virtual power plant modeling considering uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3630-3637.
- [11] 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 on key technologies of multi-integration highly-resilient power grid[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(12): 35-43.
- [12] HUANG Z, FANG B, DENG J. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G-enabled electric vehicles in building integrated energy system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 48-55.
- [13] 彭春华,张金克,陈露,等. 计及差异化需求响应的微电网源荷储协调优化调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):1-7.
PENG Chunhua, ZHANG Jinke, CHEN Lu, et al. Source-load-storage coordinated optimal scheduling of microgrid considering differential demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 1-7.
- [14] 范宏,鲁家阳,陆骁霄. 考虑激励型需求响应的多区域综合能源系统协同规划[J/OL]. 电测与仪表. [2021-08-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.th.20210508.1013.004.html>.
- [15] 张有兵,任帅杰,杨晓东,等. 考虑价格型需求响应的独立型微电网优化配置[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):55-62.
ZHANG Youbing, REN Shuaijie, YANG Xiaodong, et al. Optimal configuration considering price-based demand response for stand-alone microgrid[J]. Electric Power Automation Equip-

- ment, 2017, 37(7):55-62.
- [16] 鉴庆之, 刘晓明, 杨金叶, 等. 考虑需求响应的电力系统灵活性资源优化配置[J]. 现代电力, 2021, 38(3):286-296.
JIAN Qingzhi, LIU Xiaoming, YANG Jinye, et al. Optimal allocation of power system flexible resources considering demand response[J]. Modern Electric Power, 2021, 38(3):286-296.
- [17] 曾鸣, 马少寅, 刘洋, 等. 基于需求侧响应的区域微电网投资成本效益分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(7):190-193, 213.
ZENG Ming, MA Shaoyin, LIU Yang, et al. Investment cost-benefit analysis of regional micro-grid based on demand-side response[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(7):190-193, 213.
- [18] 李成鑫, 刘凡, 汪颖, 等. 需求响应在电网规划中的研究现状与展望[J]. 供用电, 2016, 33(6):73-76, 80.
LI Chengxin, LIU Fan, WANG Ying, et al. Research status and prospects of demand response in network planning[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(6):73-76, 80.
- [19] 秦清, 韩蓓, 李国杰, 等. 含智能软开关的配电网多阶段弹性力学映射与评估[J]. 电工技术学报, 2021, 36(21):4444-4458.
QIN Qing, HAN Bei, LI Guojie, et al. Multi-stage elastic mechanical modelling and evaluation of distribution networks with soft open point[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21):4444-4458.
- [20] QIN Q, HAN B, LI G, et al. Capacity allocations of SOPs considering distribution network resilience through elastic models[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 134:107371.

作者简介:



李志浩

李志浩(1990—),男,工程师,博士,主要研究方向为电力系统稳定与控制、微电网能量管理技术(E-mail:lizhh@zju.edu.cn);

赵波(1977—),男,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为分布式发电与微电网技术(E-mail:zhaobozju@163.com)。

(编辑 李玮)

Optimal allocation strategy of demand response for improving distribution network elasticity

LI Zhihao¹, ZHAO Bo¹, LIN Da¹, NI Chouwei¹, QIN Qing², HAN Bei², LI Guojie²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;

2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The development of society and economy puts forward higher requirements for the power supply quality of the power system. The distribution network connected with users is particularly susceptible to disturbances, so its energy supply elasticity needs to be strengthened. With the development of smart grid technology, the energy supply elasticity of grid can be improved by optimizing resource allocation and dispatching demand response resources flexibly. The multi-stage elasticity evaluation model based on mechanical mapping model is used to quantify the effect of the optimal configuration of demand response on the improvement of distribution network elasticity, and the nonlinear optimization problem is solved by genetic algorithm. Finally, the IEEE 33-bus system is taken as an example to verify the rationality and effectiveness of the model in the demand response configuration problem, and the effect of the optimal configuration scheme on the improvement of distribution network elasticity is analyzed.

Key words: distribution network; elasticity; elasticity mechanical mapping; demand response; optimal allocation strategy; genetic algorithm

附录 A

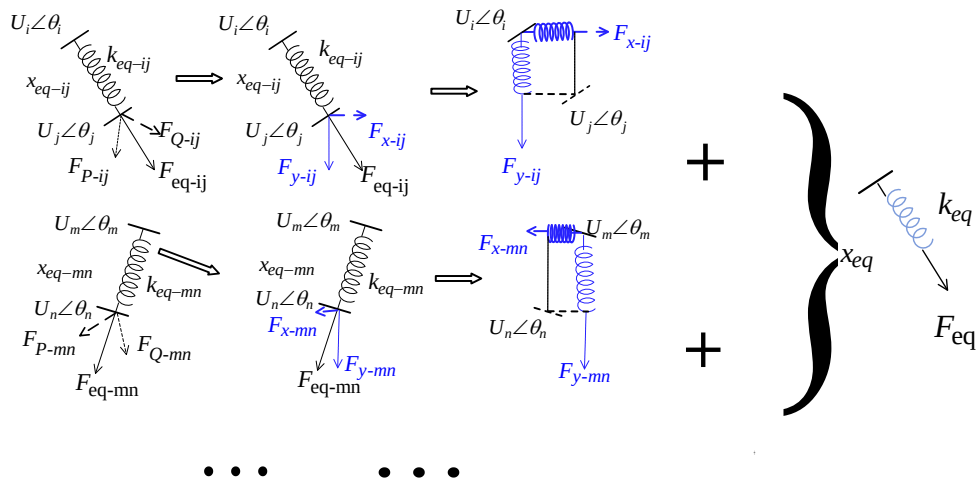


图 A1 等效分支模型
Fig.A1 Equivalent branch model

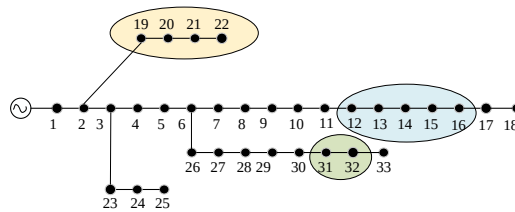


图 A2 IEEE 33 节点测试系统
Fig.A2 IEEE 33-bus test system