

考虑可靠性的中压配电系统供电能力评估

刘洪¹, 李吉峰¹, 张家安², 孙昊¹, 刘伟³, 屈高强⁴

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 300072; 2. 河北工业大学控制科学与工程学院, 天津市 300401; 3. 中国电力科学研究院, 北京市 100192; 4. 国网宁夏电力公司经济技术研究院, 宁夏回族自治区银川市 750011)

摘要: 针对现有供电能力评估方法采用 $N-1$ 安全准则作为刚性约束而产生过量裕度的问题, 提出了考虑供电可靠性的中压配电系统供电能力评估方法。首先, 构建以最大供电能力为目标、供电可靠性为主要约束的非线性数学模型; 其次, 结合馈线分区理念并考虑负荷的时序特性, 发展了含主变的配电系统可靠性评估序贯蒙特卡洛模拟法; 在此基础上, 基于典型用户类型及其负荷之间的解析关系, 通过增供负荷及其用户数量将供电能力与可靠性进行关联; 最后, 基于遗传算法提出了满足某一确定供电可靠性指标要求的配电系统供电能力优化求解方法。算例结果表明, 该方法能够有效释放配电系统供电能力, 挖掘供电潜力。

关键词: 配电系统; 供电能力; 馈线分区; 供电可靠性; 遗传算法

0 引言

配电系统作为电能生产、传输和使用的重要环节, 是联系用户与发、输电系统的纽带^[1], 科学、合理地计算配电系统供电能力, 即负荷供应能力^[2], 是当前城市电网精细化评估与发展的关键环节。另一方面, 对于大型城市而言, 土地资源紧张, 变电站址与线路通道走廊获取困难, 若通过评估现有配电系统的供电能力来挖掘其供电潜力则可充分利用现有资源, 提高资产利用率。因此, 供电能力受到越来越多的关注, 逐渐成为评价配电系统的一项主要指标。

有关配电系统供电能力的计算方法目前主要体现为两类, 即基于配电系统潮流计算的方法和基于配电系统安全准则的方法。在基于配电系统潮流计算的方法中, 最直接的方法是尝试法^[3], 即通过不断改变系统负荷并进行潮流计算来获取系统所能承受的最大负荷量值。为解决其计算过程繁琐费时的问题, 又发展出了考虑直流潮流等约束条件的配电系统供电能力优化计算模型^[4-5]。该方法可在节点电压、回路功率等系统约束条件下求得配电系统所能承受的最大负荷, 并以此作为评估系统供电能力的主要依据。在基于配电系统安全准则的方法中, 最

典型的是计及 $N-1$ 安全准则的配电系统供电能力评估方法。该方法从供电连续性角度出发, 并且考虑主变互联关系^[6]、变电站间负荷转移^[7]等因素, 在 $N-1$ 准则下校验其供电能力。其中文献[8]进一步建立了基于馈线互联的供电能力计算模型, 从而完整反映网架互联信息, 并将计算结果精确到了供电能力在馈线上的负荷分布; 文献[9-10]对馈线联络的作用与机理进行了分析和应用, 为优化配电网提供了新的依据; 而文献[11]认为供电能力是满足 $N-1$ 安全且所供负荷最大的一个安全边界点, 并采用 $N-1$ 安全准则来校验供电能力的准确性。相比基于潮流计算的方法, 计及 $N-1$ 安全准则的供电能力评估方法考虑了电网安全运行的需要, 在转供需求下求取设备最大允许负载率, 从而兼顾了配电系统的可靠性与经济性指标, 保证了向用户提供不间断电能的能力。

然而, 对于计及 $N-1$ 安全准则的配电系统供电能力计算方法, 需考虑电网在尖峰负荷时刻刚性满足 $N-1$ 校验, 但在实际电网运行中, 尖峰负荷通常是均值负荷的数倍且持续时间很短^[12], 依此原则评估得出的供电能力将具有很大裕度, 电网资产在绝大多数时间不能被充分利用。反之, 若在供电能力评估过程中将可靠性指标作为约束条件, 用以反映具有持续波动特征的负荷与恒定电网容量之间的平衡要求, 则可大幅提升资产利用效率。

为此, 本文首先构建了考虑可靠性的中压配电系统供电能力评估模型; 其次, 结合馈线分区并考虑

收稿日期: 2016-08-02; 修回日期: 2016-12-14。

上网日期: 2017-04-10。

国家自然科学基金资助项目(51477116); 国家电网公司科技项目“基于大数据的配电网投入产出效益分析与决策技术研究”。

负荷时序特性,发展了含主变的配电系统可靠性评估序贯蒙特卡洛模拟法,基于用户数与增供负荷间关系的解析,将供电能力与可靠性评估相耦合,同时考虑了不同负荷类型对于用户数的影响;最后,提出了基于遗传算法的模型优化方法和计算流程,并通过实例分析验证了本文所提方法的有效性与实用性,进一步证明本文方法更适应配电系统建设与运行的特点,能够充分挖掘系统供电潜力,更大地发挥资产利用效能。

1 中压配电系统供电能力评估模型

供电能力是指在满足一定安全准则的条件下,一定区域内配电系统能供应用户用电的最大能力。

模型的目标函数如下:

$$\max P_{psc} = \sum_i (R_i T_i) \quad (1)$$

式中: P_{psc} 为待评估配电系统的供电能力; R_i 为主变 i 的额定容量; T_i 为主变 i 的负载率。

在评估系统供电能力的过程中,优化对象为馈线所供负荷峰值,并以可靠性作为主要约束条件,结合配电系统自身运行特点,约束条件如下。

1) 供电可靠性约束

该约束条件表示的是根据不同配电系统结构以及规划区域对于可靠性的要求所设定的不同可靠性目标,并以此作为供电能力计算的主要约束条件。选取平均供电可用度(ASAI)为可靠性指标,具体表现形式为:

$$A_{ASAI} = \frac{\text{用户用电小时数}}{\text{用户需电小时数}} = \frac{T \sum N_j - \sum U_j N_j}{T \sum N_j} \geq E \quad (2)$$

式中: T 为在规定时间内需电小时数; U_j 为负荷点 j 的年停运时间; N_j 为负荷点 j 的用户数; E 为结合配电系统运行基础所设定的可靠性目标。

2) 负荷匹配约束

该约束条件表示的是配电系统中各主变与所连接馈线之间的负载匹配关系,具体表现形式为:

$$R_i T_i = \sum_q R_{iq} T_{iq} \quad (3)$$

式中: R_{iq} 和 T_{iq} 分别为与第 i 台主变相连的第 q 条馈线的容量和负载率。

3) 负载率约束

该约束条件表示的是上述各相关主变、馈线负载率的取值范围,具体表现形式为:

$$0 \leq T_i \leq 1 \quad (4)$$

$$0 \leq T_{iq} \leq 1 \quad (5)$$

4) 电压约束

该约束条件表示的是配电网各馈线末端节点的电压运行约束,具体表现形式为:

$$V_{iq\min} \leq V_{iq} \leq V_{iq\max} \quad (6)$$

式中: V_{iq} 为与第 i 台主变相连的第 q 条馈线的末端节点电压; $V_{iq\max}$ 和 $V_{iq\min}$ 分别为对应馈线末端节点电压的上下限。

2 含主变的配电系统可靠性评估

2.1 基于馈线分区的故障分析

供电可靠性主要用以量度和评估电力系统向电力用户提供不间断的合格电能的能力。常用的可靠性计算方法主要有解析法^[13]与蒙特卡洛模拟法^[14-15]两大类。本文结合馈线分区^[16]的概念进行系统故障分析,进而采用序贯蒙特卡洛模拟法^[17-18]计算配电系统的可靠性指标,并将计算结果作为评判式(2)的基础。

结合馈线分区的概念将配电网划分为最小隔离区和自动隔离区。最小隔离区是具有共同入口元件的元件集合,入口元件为开关和保护装置,且每一最小隔离区只包括一个入口元件^[19]。而在故障发生时,重点关注的是开关能否自动动作,定义以自动开关为边界的区域为自动隔离区。在自动隔离区内,任何元件的故障均会造成相同的自动开关动作,且每一自动隔离区内至少包括一个最小隔离区。

以馈线分区为单元进行配电网的故障分析可以大幅减少工作量,具体分析过程如下。

1) 单一最小隔离区故障(即最小隔离区内线路与配变故障):将故障的最小隔离区停电时间置为故障修复时间;最小隔离区的下游区中可转供区域,停电时间置为故障隔离与转供时间,不可转供的区域,停电时间置为故障修复时间;由故障分区所属自动隔离区得到其自动隔离开关,自动隔离开关上游区停电时间为0;其余区域停电时间为故障隔离时间。

2) 相连两最小隔离区同时发生故障(即开关故障):以前向最小隔离区故障为基准,按过程1)所述确定各负荷点停电时间,并将后向的最小隔离区停电时间置为故障修复时间。

3) 主变故障:先通过母联进行站内的负荷转供,对于无法站内转供的负荷再通过联络线路进行站间转供。结合主变与馈线的负载率约束,对下游待转供区域进行递进式的故障处理,判断各条馈线所受的影响并将故障影响区域以及停电时间等数据传递给下游配电网,由下游配电网对数据进行与过程1)和2)相同的分析处理。

4) 母线故障:负荷只能通过联络线路转供,可转

供的负荷停电时间置为故障隔离时间与转供时间,其余负荷停电时间置为故障修复时间。

根据具体负荷值,结合上述分析过程,可以确定各类区域以及主变、母线故障时负荷点的停电时间。

2.2 负荷时序模型的建立

本文采用文献[20]的负荷模型以反映负荷的时变特性,即通过负荷的周、日、小时百分比系数及年负荷峰值得到年负荷序列,第 t 小时的实时负荷为:

$$L_t = L_p P_w P_d P_h(t) \quad (7)$$

式中: L_p 为年负荷峰值,即本文的优化对象; P_w 为与第 t 个小时对应的年-周负荷百分比系数; P_d 为对应的周-日负荷百分比系数; $P_h(t)$ 为对应的日-小时负荷百分比系数。

考虑负荷的持续波动特征并建立其时序模型后,可靠性评估的结果更贴近实际情况,供电能力与可靠性的关系描述也将更为准确。

2.3 用户数解析与可靠性指标计算

由于本文选择了配电网规划过程中更普遍直观的 ASAI 作为可靠性指标,因此需要引入“用户数”作为重要参数并对其进行分析。考虑到可以通过各负荷点用户数的增加量来判定供电能力的提升效果,而供电能力的提升意味着线路与主变负载率的增大,因此可以通过建立用户数与负载率的联系将可靠性与供电能力的评估耦合起来。由于节点用户数为离散变量,而负载率为连续变量,因此负荷节点 j 的用户数 N_j 的解析如式(8)所示。

$$N_j = [n_j T_j] \quad (8)$$

式中: T_j 为负荷节点 j 所在馈线的负载率; n_j 为负荷节点 j 所在馈线的负载能力达到 100% 时,负荷节点 j 的用户数; $[]$ 表示向下取整。

而不同类型的用户由于其负荷量值不同,所在馈线负载率达到 100% 时可供应的用户数 n_j 也不同,因此本文用户数的解析计及了用户类型的影响。

故 ASAI 指标又可表示为:

$$A_{\text{ASAI}} = 1 - \frac{\sum U_j [n_j T_j]}{T \sum [n_j T_j]} \quad (9)$$

采用序贯抽样法得到故障发生的具体时刻,从而反映负荷的时序特性。元件模型为两状态马尔可夫模型,故障转移率为 λ ,修复转移率为 μ 。本文可靠性评估的过程中重点考虑单重故障的影响。元件的无故障工作时间与故障修复时间均服从指数分布,其状态的序贯抽样采用状态持续时间抽样法^[21]。

一个具有 m 个元件的系统,其基于状态持续时间抽样的序贯蒙特卡洛法可靠性评估流程如下。

步骤 1:初始化模拟时钟为 0,随机产生 m 个 0 至 1 之间的随机数,根据每个元件状态模型中的故障转移率 λ 求得 m 个无故障运行时间 T_{TF} , $T_{\text{TF}i}$ 表示第 i 个元件的无故障运行时间。

步骤 2:找出最小的 $T_{\text{TF}i}$,对第 i 个元件产生一个随机数,根据其修复转移率参数 μ 求得故障修复时间 $T_{\text{TR}i}$;并产生故障隔离与负荷转供时间,将模拟时钟推进到 $T_{\text{TF}i}$ 。

步骤 3:由负荷时序模型读取第 i 个元件故障时刻各负荷点的负荷值,并结合 2.1 节的故障分析过程计算各负荷点的停电时间。

步骤 4:产生一个新的随机数,将其转化为元件 i 新的运行时间 $T_{\text{TF}i}'$ 。

步骤 5:判断模拟时钟是否跨年,未跨年则将记录的负荷点停电时间累加到当年负荷点年停运时间 U_j 中;如跨年则采用式(9)计算系统的可靠性指标。

步骤 6:判断模拟时钟是否达到所需时间长度,达到执行步骤 7,未达到则返回步骤 2。

步骤 7:模拟过程结束,统计各个模拟年的可靠性指标,进而计算系统可靠性指标的均值,即 ASAI。

3 供电能力模型优化求解

3.1 基于遗传算法的求解方法

选用遗传算法对供电能力模型进行优化。遗传算法由解编码、个体适应度评估和遗传运算三大模块构成。本文采用二进制编码规则,精度取小数点后两位,以提升遗传算法对连续变量进行优化时的准确度。生物遗传概念中的基因段与染色体分别对应单一馈线负载率和网络全部馈线负载率的编码;个体表示全部馈线的负载率,而种群为若干个体的集合。

以系统供电能力作为适应度函数。遗传运算包括染色体选择、交叉与变异三部分。染色体选择采用轮盘赌法^[22],保证适应度高的个体以较大概率参与到遗传运算之中;交叉为单点交叉,交叉概率为 0.8;变异运算使用单点变异,变异概率为 0.02。

对于模型中约束条件的处理,本文选用搜索空间限定法^[23],即对每次遗传运算后的所有个体进行约束条件的校验,仅保留其中满足约束的个体。之后进行下一轮的遗传运算,此时种群中的个体数目可能小于初始种群规模,通过轮盘赌选择操作补足个体规模,但个体之间可能重复,需要进一步的交叉与变异运算保证种群中个体的多样性。

3.2 求解流程

结合遗传算法的配电系统供电能力评估的基本流程如图 1 所示。

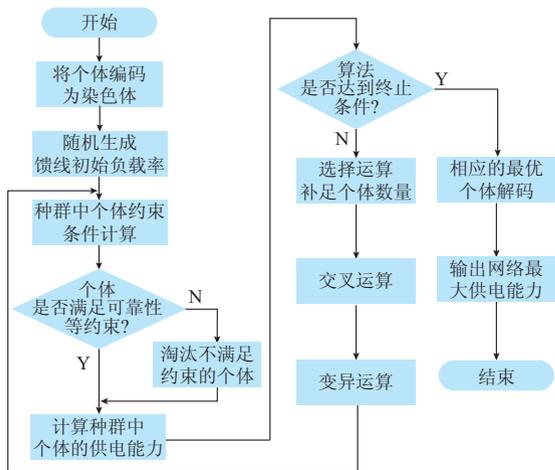


图 1 供电能力评估流程图

Fig.1 Flow chart of power supply capability evaluation

对于个体约束条件的处理,式(2)中可靠性指标的计算方法在第 2 节中已详细阐述;式(3)作为等式约束是进行可靠性与供电能力计算的基本前提;式(4)与式(5)在遗传算法负载率的优化过程中作为优化对象的取值范围而得到满足,在故障后的可靠性指标计算中作为判断负荷能否转供的前提条件而得到满足。另外,每次通过遗传运算产生新个体后需要进行配电网的潮流计算以求取馈线末端节点电压,判断个体是否满足式(6)的约束。

算法的终止条件为迭代过程中的最大供电能力结果收敛或达到最大迭代次数,基于上述流程反复进行个体遗传运算,直至算法达到终止条件,输出网络能够满足可靠性等约束条件下的最大供电能力。

4 算例分析与对比

4.1 算例概况

以某地区的实际配电网结构作为算例,其基于馈线互联关系的联络结构如图 2 所示。变电站 S1 与 S2 的容量均为 2×20 MVA, S3 的容量为 2×31.5 MVA,主变间的联络容量见文献[1],各变电站低压侧所带元件数量见附录 A 表 A1。其中 S1 与 S2 变电站每一条馈线出线采用三分段单联络接线模式, S3 变电站每一条馈线出线采用四分段单联络接线模式。基于馈线 $N-1$ 准则,结合 10 kV 馈线型号,得到馈线初始状态见附录 A 表 A2。

在进行可靠性计算的过程中重点考虑网架结构中单一元件的故障对于负荷点的影响,具体包括:主变故障、母线故障、配电变压器故障、断路器故障、线路故障和开关故障等。各类元件的可靠性参数见附录 A 表 A3,故障隔离时间与隔离后的转供时间均取 1 h;居民、商业与工业负荷点的单位负荷量大小

分别为 0.180 2, 0.469 7, 0.847 2 MW/户,系统各负荷节点初始用户数均为 1。

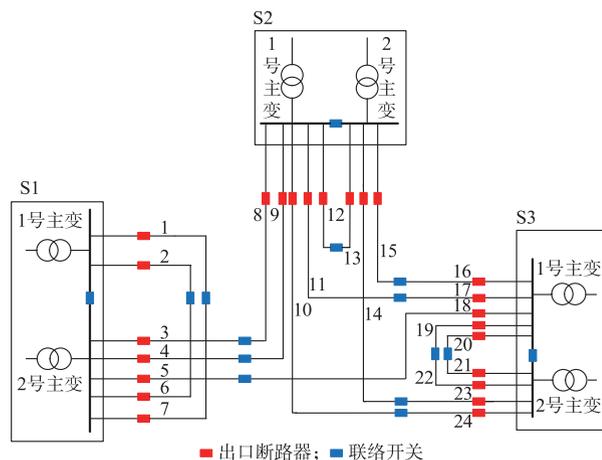


图 2 系统主变联络关系示意图

Fig.2 Schematic diagram of interconnections among main transformers in system

基于上述说明,算例整体包括 3 个变电站、6 台主变、24 条馈线、297 个负荷节点(10 个工业负荷节点、56 个商业负荷节点、231 个居民负荷节点)、373 个 315 kVA 的配电变压器。

4.2 求解结果

利用本文所述方法求解算例满足可靠性约束条件下的最大供电能力,将详细结果绘制成图 3 所示曲线以便更好地展示趋势。

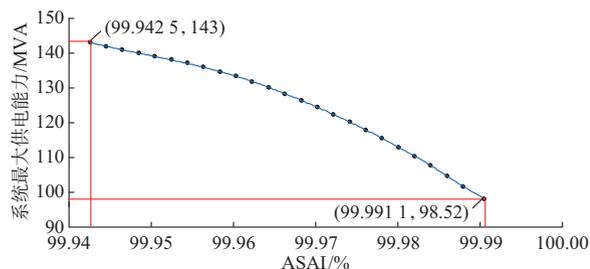


图 3 可靠性目标约束与系统供电能力之间关系

Fig.3 Relation between reliability constraint and total supply capability of system

根据上述结果可以分析得到:如果提高系统的可靠性指标,即 ASAI,意味着系统中负荷的可转供裕度增加,而系统中所带的负荷量降低,造成供电能力下降,且供电能力的减少量随着可靠性约束的严格而逐渐增加。

当所有主变负载率达到 100%时,系统考虑负荷时序特性的 ASAI 为 99.942 5%,在此情况下的系统最大供电能力为 143 MVA,占馈线总容量的 62.08%,此为网络的极限供电能力,进一步提高馈线负载率会造成主变在尖峰负荷时刻的过载运行。

而当网络的 ASAI 指标为 99.991 1% 时,系统最大供电能力为 98.52 MVA,占主变总容量的 68.90%,占馈线总容量的 42.77%。此为基于传统的馈线 N-1 准则并考虑文献[1]中联络容量约束得到的最大供电能力。此时的系统能够满足尖峰负荷时刻的 N-1 约束,由于本文可靠性评估的过程中重点考虑单重故障的影响,所以配电网在该运行点达到了最高供电可靠率。当系统可靠性约束低于该运行点供电可靠率数值,即部分线路不满足 N-1 准则时,系统最大供电能力提升,从而减少传统评估方法产生的过量裕度,释放网络供电潜力。

4.3 经济性分析

在配电系统中元件总投资不变的条件下,降低可靠性指标而增大系统供电能力可以减少单位负荷的投资成本,而可靠性指标的下降意味着停电损失的增加。显然,需要综合考虑投资成本与停电损失的影响,并结合上述数据确定出一个使区域内总供电成本最低的最佳可靠性指标与供电能力。

根据系统中主变、配变、馈线以及开关元件的投资和检修费用,按照“等年值”法,转化为系统年费用值作为年投资总成本。系统规划期为 20 a,各元件的投资费用以及年检修费用率(年检修费用与投资费用的比值)见附录 A 表 A4。

可以采用产电比对停电损失进行估算。产电比定义为某一时期某一地区国内生产总值(GDP)与全社会用电量之比,根据 2015 年 GDP 与全社会用电量,中国的产电比约为 12.19 元/(kW·h)。其计算方法相对简单,但仅通过 GDP 反映供电不足的影响而并未考虑电能的附加价值,估算结果过于保守。而实际停电损失的计算还要考虑具体的停电用户类型、停电时间、地理环境等各种因素,通过详细的停电数据统计,构造电力用户损失函数以精确计算用户供电可靠性价值^[24]。文献[24]通过调查计算得到美国 2002 年的“用户供电可靠性价值”为 97 美元/(kW·h),根据中国和美国产电比的比值与汇率^[25],可初步计算出中国的“用户供电可靠性价值”约为 200 元/(kW·h)。

根据算例系统的年缺供电量计算产电比与“用户供电可靠性价值”两种描述方法下的停电损失,分别与年投资总成本相加并结合最大供电能力得到单位负荷保守供电成本与单位负荷精确供电成本。系统可靠性指标与相应单位负荷供电成本的关系分别如图 4(a)与(b)所示。

通过分析可知,对于不同的停电损失计算方法,

区域内系统的最佳供电能力与供电可靠性均有所不同。基于产电比量化停电损失时,由于降低供电可靠性所带来的停电损失增加量小于投资费用的减少量,达到更高的供电能力对系统更为有利;而考虑更高的“用户供电可靠性价值”时,供电总成本中停电损失的比重更大,则提升可靠性指标可以显著降低供电成本。上述两类分析方法表明,不同的停电损失下配电网的单位负荷供电成本变化趋势不同。当实际区域的停电损失处于上述两者之间时,例如某区域的停电损失为 95 元/(kW·h),停电损失与投资之间可以实现平衡,其可靠性指标与相应的单位负荷总供电成本关系如图 4(c)所示。

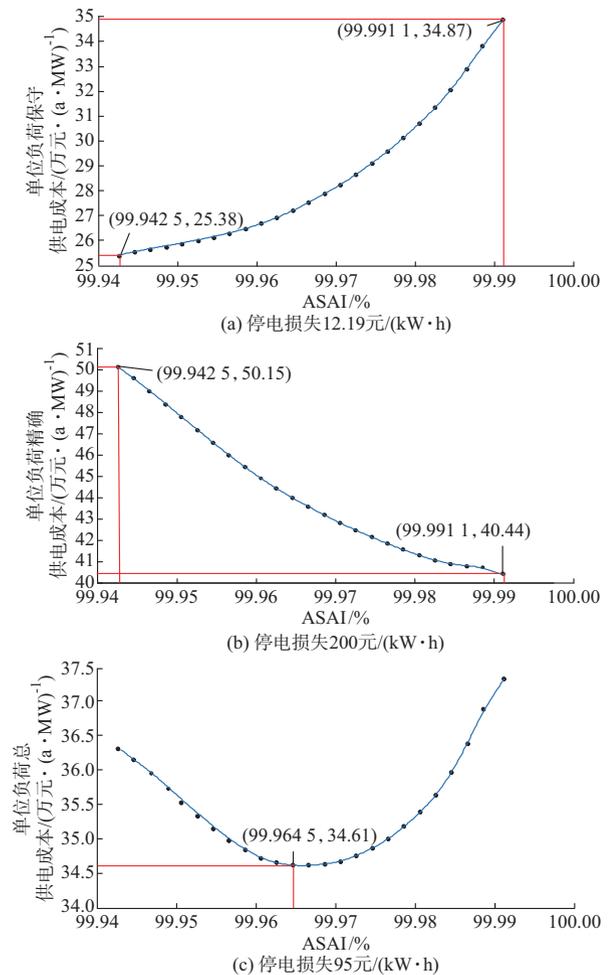


图 4 可靠性指标与单位负荷供电成本之间关系
Fig.4 Relation between reliability index and supply cost of unit load

对于该区域,实现 99.964 5% 供电可靠率的效益最佳,此时的系统供电能力为 130.18 MVA。进一步考虑不同的区域停电损失情况,可以得到系统 ASAI 与供电能力,结果如表 1 所示。

表1 不同停电损失下的最优供电可靠率与供电能力
Table 1 Optimal reliability rate and supply capability under different loss of outage

停电损失/ (元·(kW·h) ⁻¹)	最优供电可靠率/%	最优供电能力/MVA
45	99.950 5	139.11
70	99.960 5	133.37
95	99.964 5	130.18
130	99.976 5	118.07
170	99.984 5	107.96

5 结语

配电网供电能力评估能直观反映负荷供应能力与设备利用效率,而配电网可靠性指标可以衡量系统向用户提供不间断合格电能的能力。本文针对现有刚性约束下供电能力评估会产生过量裕度的缺点,提出了考虑柔性可靠性约束的中压配电系统供电能力评估模型,并选用遗传算法对模型进行优化求解,得到满足特定可靠性指标的配电网最大供电能力。

模型既解决了基于 $N-1$ 刚性约束下供电能力评估过度防御、资源浪费的缺点,又能在某些对于可靠性要求不高的地区以具体可靠性指标作为约束优化最大供电能力,释放供电潜力,提升电网建设与运行的经济性。

未来配电网中,大量的分布式电源将会接入系统,负荷在具有差异化可靠性需求的同时也将呈现一定的主动特征。在此背景下,基于柔性约束的供电能力分析规划将是后续的重要研究方向。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- 葛少云,韩俊,刘洪,等.计及主变过载和联络容量约束的配电系统供电能力计算方法[J].中国电机工程学报,2011,31(25):97-103.
GE Shaoyun, HAN Jun, LIU Hong, et al. Power supply capability determination considering constraints of transformer overloading and tie-line capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 97-103.
- KAREN N M, HSIAO-DONG C. Electric distribution system load capability: problem formulation, solution algorithm, and numerical result[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1): 436-422.
- 陈浩,张焰,俞国勤,等.配电网最大供电能力计算方法[J].中国电力,2009,42(8):20-23.
CHEN Hao, ZHANG Yan, YU Guoqin, et al. A new algorithm to evaluate maximum load supplying capability of distribution network[J]. Electric Power, 2009, 42(8): 20-23.
- 邱丽萍,范明天.城市电网最大供电能力评价算法[J].电网技术,2006,30(9):68-71.
QIU Liping, FAN Mingtian. A new algorithm to evaluate maximum power supply capability of urban distribution network [J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 68-71.
- 李振坤,陈星莺,刘皓明,等.配电网供电能力的实时评估分析[J].电力系统自动化,2009,33(6):36-38.
LI Zhenkun, CHEN Xingying, LIU Haoming, et al. Online assessment of distribution network loading capability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 36-38.
- 王成山,罗凤章,肖峻,等.基于主变互联系数的配电系统供电能力计算方法[J].中国电机工程学报,2009,29(13):86-91.
WANG Chengshan, LUO Fengzhang, XIAO Jun, et al. An evaluation method for power supply capability of distribution system based on analyzing interconnections of main transformers [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 86-91.
- 廖怀庆,刘东,黄玉辉,等.基于公共信息模型拓扑收缩的配电网转供能力分析[J].电网技术,2012,36(6):51-55.
LIAO Huaqing, LIU Dong, HUANG Yuhui, et al. Analysis on transfer capability of distribution network based on CIM topological contraction[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 51-55.
- 肖峻,谷文卓,王成山,等.基于馈线互联系数的配电网最大供电能力模型[J].电力系统自动化,2013,37(17):72-77.
XIAO Jun, GU Wenzhuo, WANG Chengshan, et al. A total supply capability model for power distribution network based on feeders interconnection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 72-77.
- 肖峻,祖国强,贺琪博,等.馈线联络对配电网最大供电能力的作用机理[J].电力系统自动化,2015,39(8):38-44.DOI:10.7500/AEPS20140722001.
XIAO Jun, ZU Guoqiang, HE Qibo, et al. Influence mechanism of feeder links on total supply capability for distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 38-44. DOI: 10.7500/AEPS20140722001.
- 肖俊,李思岑,王丹.计及用户分级与互动的配电网最大供电能力模型[J].电力系统自动化,2015,39(17):19-25.DOI:10.7500/AEPS20150330017.
XIAO Jun, LI Sicen, WANG Dan. Model of total supply capability for distribution network considering customer classification and interaction [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 19-25. DOI: 10.7500/AEPS20150330017.
- 肖峻,贡晓旭,王成山.配电网最大供电能力与 $N-1$ 安全校验的对比验证[J].电力系统自动化,2012,36(18):86-90.
XIAO Jun, GONG Xiaoxu, WANG Chengshan. Comparative research between total supply capability and $N-1$ security verification for distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 86-90.
- 余贻鑫,栾文鹏.智能电网的基本理念[J].天津大学学报:自然科学与工程技术版,2011,44(5):377-384.
YU Yixin, LUAN Wenpeng. Basic philosophy of smart grid [J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2011, 44(5): 377-384.
- LISNIANSKI A, HAIM H B. Short-term reliability evaluation for power stations by using L_z -transform [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(2): 110-117.
- 别朝红,王锡凡.蒙特卡洛模拟法在评估电力系统可靠性中的应用[J].电力系统自动化,1997,21(6):68-75.
BIE Zhaohong, WANG Xifan. The application of Monte Carlo

- method to reliability evaluation of power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(6): 68-75.
- [15] 马振宇. 电网可靠性的蒙特卡洛仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 55-59.
MA Zhenyu. Research of Monte Carlo simulation for power system reliability assessment[J]. Power System Protection & Control, 2009, 37(14): 55-59.
- [16] 谢莹华, 王成山. 基于馈线分区的中压配电系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 35-39.
XIE Yinghua, WANG Chengshan. Reliability evaluation of medium voltage distribution system based on feeder partition method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 35-39.
- [17] 葛少云, 王浩鸣, 徐栋. 基于蒙特卡洛模拟的分布式风光蓄发电系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 39-44.
GE Shaoyun, WANG Haoming, XU Li. Reliability evaluation of distributed generating system including wind energy, solar energy and battery storage using Monte Carlo simulation[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 39-44.
- [18] GE Shaoyun, WANG Shiju, LU Zhiying, et al. Substation planning method in an active distribution network under low-carbon economy[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(4): 468-474.
- [19] 蔡乐, 邓佑满, 朱小平. 改进的配电网故障定位、隔离与恢复算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(16): 48-50.
CAI Le, DENG Youman, ZHU Xiaoping. An improved algorithm of fault location, isolation and restoration for distribution systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(16): 48-50.
- [20] WANG Peng, BILLINTON R. Time sequential distribution system reliability worth analysis considering time varying load and cost models[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3): 1046-1051.
- [21] BILLINTON R, WANG P. Teaching distribution system reliability evaluation using Monte Carlo simulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(2): 397-403.
- [22] 高元海, 王淳. 无重访遗传算法及其在输电网络规划中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 110-117.
GAO Yuanhai, WANG Chun. Non-revisiting genetic algorithm and its application in transmission network planning [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 110-117.
- [23] 黄宗南, 何岚岚, 舒洲. 切割用量遗传优化中的约束条件处理[J]. 机械设计与研究, 2008, 24(4): 93-97.
HUANG Zongnan, HE Lanlan, SHU Zhou. Constraints handling in cutting optimization by genetic algorithm [J]. Machine Design & Research, 2008, 24(4): 93-97.
- [24] LACOMMARE K H, ETO J H. Cost of power interruptions to electricity consumers in the United States [J]. Energy, 2006, 31(12): 1845-1855.
- [25] SUN Bing, YU Yixin. A calculation method for a power user's CIC under specific conditions in smart distribution grid [J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(7): 1-11.

刘洪(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 智能配电系统及综合能源系统的规划与评估。E-mail: liuhong@tju.edu.cn

李吉峰(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向: 城市电网规划和电力系统可靠性。E-mail: lijifeng2014@163.com

张家安(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 新能源建模与仿真及接入电网分析。E-mail: zhangjiaa@foxmail.com

(编辑 郑颖)

Power Supply Capability Evaluation of Medium Voltage Distribution System Considering Reliability

LIU Hong¹, LI Jifeng¹, ZHANG Jiaan², SUN Hao¹, LIU Wei³, QU Gaoqiang⁴

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China;

2. School of Control Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

4. Economic Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750011, China)

Abstract: The existing power supply capability evaluation method based on $N-1$ safety criterion as rigid constraint can bring about excess margin. To remedy the situation, a power supply capability evaluation method of medium voltage distribution system considering power supply reliability is proposed. Firstly, a nonlinear mathematical model is developed with total supply capability as the objective and power supply reliability as the main constraint. Secondly, by referring to the notion of feeder partition, the sequential Monte Carlo simulation method is used to evaluate the reliability of distribution system including the main transformer. And based on the analytic relationship between the typical type of the users and its load, a relationship between the power supply capability and reliability is built by increasing the load and the number of users. Finally, based on the genetic algorithm, a power supply capability optimal solution method is designed to meet the demand of a certain reliability index. Results of the numerical example indicate that the method can effectively release the power supply capability of distribution system and tap the potentialities of power supply.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477116) and State Grid Corporation of China.

Key words: distribution system; power supply capability; feeder partition; power supply reliability; genetic algorithm