

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.02.004

分级骨干网架的构建及其经济效益评估方法

林 潇, 刘 洋, 许立雄, 马晨霄, 朱嘉远

(四川大学 电气信息学院, 成都 610065)

摘要: 构建骨干网架是差异化规划电网以提高其抵抗自然灾害能力的关键手段, 基于设备重要度和抗灾效益评估的阶梯式分级骨干网架建设能够兼顾电网建设的抗灾性和经济性。本文根据系统源、荷和支路的重要度评估, 提出了分级骨干网架构建方法, 以全寿命周期成本理论为基础并考虑设备等级、使用寿命和折旧价值, 构建差异化建设投资成本计算模型, 以各级负荷典型用户为代表建立负荷侧停电损失模型并与发电侧和电网侧效益组成分级骨干网架抗灾效益, 结合成本模型形成差异化建设经济效益评估体系。最后以 IEEE 118 系统为例搜索分级骨干网架并设计多种抗灾建设方案, 通过投资成本和收益的对比, 证明了分级骨干网架建设的经济性和抗灾效益评估体系的合理性与可行性。

关键词: 分级骨干网架; 全寿命周期成本; 负荷停电损失; 经济性评估

中图分类号: TM727

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2019)02-030-11

Construction of graded backbone grid and its economic assessment

LIN Xiao, LIU Yang, XU Lixiong, MA Chenxiao, ZHU Jiayuan

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, P. R. China)

Abstract: Identifying backbone grid is of great significance to the differential planning of power grid in that it can improve the resistance to natural disasters effectively. The stepwise graded backbone grid based on the evaluation of both equipment importance and the benefit of disaster resistance can balance disaster resistance and economy of power grid construction. This paper presents an approach to construct graded backbone according to the classification of power sources, loads and branches. Based on the life cycle cost theory, the cost calculation model of the differential construction is established with the grade of equipment, service life and depreciation value taken into account. The model of customer outage cost is set up with typical users as representatives, which, together with the benefits of power-generation-side and transmission-side and the cost calculation model, constitutes a set of economic assessment system. The feasibility of the method to search for graded backbone grid and the validity of the proposed assessment system are verified by simulation results of the IEEE 118-bus power system.

Keywords: graded backbone grid; life cycle cost; customer outage cost; economic assessment

收稿日期: 2018-10-25

作者简介: 林潇(1994—), 男, 四川大学硕士研究生, 主要从事电力系统运行与控制、系统规划研究, (E-mail) x_lin@stu.scu.edu.cn。

刘洋(联系人), 男, 博士, 四川大学副教授, 主要从事电力系统高性能计算及算法优化研究, (E-mail) yang.liu@scu.edu.cn。

近年来,频发的极端自然灾害给电网的安全运行带来巨大威胁,造成了严重的经济损失和社会影响^[1]。对此,国办发[2008]20号文件提出“普遍提高,重点加强”的差异化规划思路,其核心思想是确定能够在重大自然灾害中确保重要负荷持续供电的骨干网架^[2-4]。构建骨干网架提升系统的抗灾能力必然伴随投资成本的增加,而不同类型的电源及负荷停电后会造造成不同程度的经济损失,因此应该赋予不同程度的抗灾能力。因此本文考虑根据系统源、荷以及支路的重要程度差异化设计不同等级的骨干网架,而具体设备应该提升到何种抗灾等级则取决于差异化设计的经济效益评估。

目前骨干网架的构建方法有多种,文献[5]采用图论的方法计算线路和节点的重要度并以重要度高的节点和线路构成骨干网架;文献[6]提出一种系统生存性评价指标并根据系统生存性最优构建骨干网架,没有区分各类电源和负荷的重要度。上述文献只是将设备分为重要设备和一般设备并构建核心骨干网架,分类较粗略,也没有从经济角度量化评估不同类型的负荷或电源断电后造成的不同经济损失。文献[7]在考虑线路投资成本的基础上根据综合评判指标将线路分级并依次加入骨干网架中,按效益最优选出最优骨干网架,但是忽略了供电侧和用户侧的停电损失,适用于小型配电网;文献[8]在计算抗灾规划效益时考虑了设备投资、维修成本,但是没有考虑到设备的使用寿命和发电侧的停电损失。

本文首先按系统中电源和负荷停电造成的经济损失严重程度对其进行分级,并以此为基础提出一套分级骨干网架构建方案,然后基于全寿命周期成本理论设计出分级骨干网架建设的投资成本计算方法,根据用户侧停电损失调查数据构建停电损失函数模型,并从发电、输电和用电侧分析了差异化建设的抗灾效益,通过赋予不同重要度等级的设备不同抗灾设计标准并计算其抗灾效益,选出经济效益最高的方案并确定分级骨干网架中各级设备应该提升的抗灾等级,最终实现电网差异化规划设计及其抗灾效益的评估,对电网建设和改造具有一定的指导意义。

1 系统源、荷和支路分级

分级骨干网架构建方案的确定包括设备重要度评估、骨干网架构建方法、差异化建设成本计算和抗灾效益评估等技术,具体流程如图 1。

分级骨干网架的建设目的在于当发生不同严重程度的自然灾害时有选择性地保障不同重要度等级的电源的输出和对刚性负荷的持续供电,减少设备投资的同时带来尽可能大的抗灾效益。不同的电力用户对电力依赖性不一样,停电损失也有所不同,而重要电源是维持骨干系统运行的核心动力,各类发电厂也具有不同的启停机费用等断电损失。因此,将各类负荷、输电线路以及电源进行分类对于分级骨干网架的建设具有重要意义。

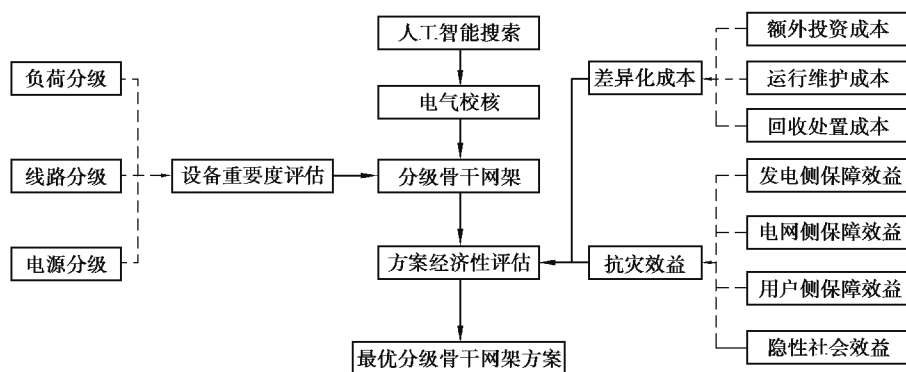


图 1 分级骨干网架方案设计流程

Fig. 1 The realization process of scheme for graded backbone grid

1.1 负荷分级

将系统中负荷分为 3 级:1 级负荷,若断电会带来大量人员伤亡,重大经济损失和政治影响等,则将其归为 1 级负荷,如矿山、医院、机场、政府机构等^[9];2 级负荷,断电会损坏设备,影响社会生产等,如各类化工厂、制造业、服务业等;3 级负荷,除 1、2 级负荷外的其他负荷,如城乡居民用电等。

1.2 电源分级

将系统中电源分为 3 级:1 级电源,以火电为主,保障出力稳定并且降低启停机费用,另外,尽量选择离 1 级负荷较近的电源作为 1 级电源,减少输电环节从而降低系统故障率且减少投资;2、3 级电源分别对应为 2、3 级负荷供电的核心电源,其中小型分布式电源由于出力波动性较大,宜作为 3 级电源。

1.3 线路分级

线路分级包括:1 级支路,特高压输电线路和受地形影响维修困难的线路因重建或维修费用太高,宜作为 1 级支路,电缆线路因其较强的抗灾性宜作 1 级线路,另外 1 级电源输出端和为 1 级负荷供电的线路作为 1 级支路;2、3 级支路分别为 2、3 级电源主要输出支路以及为 2、3 级负荷供电的线路,具体以分级骨干网架搜索结果为准。

2 分级骨干网架设计

电网的抗灾设计主要是为了在灾害期间保障重要负荷的用电需求,但全面提升电网所有设备的抗灾标准成本太高,根据各类用户对电力的依赖程度的不同在各级自然灾害期间有选择性地保护负荷供电则更加经济合理,因此需要构建分级骨干网架。

骨干网架是特定运行方式下为保障刚性负荷持续供电而必需的满足系统连通性的线路和节点集^[10]。构建分级骨干网架需要满足以下具体条件:1)各级骨干网架必须涵盖对应的各级电源、负荷以及线路;2)满足拓扑连通性约束和系统安全运行约束;3)考虑经济性,在满足条件 1)和 2)后,各级骨干网架的支路总长度应该最小。

基于上述分析,将分级骨干网架的构建转化为一个非线性的整数规划问题,将线路运行状态作为变量,支路总长度作为目标函数,连通性和运行安全性作为约束条件,具体数学模型如下:

$$\begin{cases} \min f = \sum_{i=1}^n x_i \cdot L_i; \\ \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) = 1; \\ g(P_g, Q_g, P_{load}, Q_{load}) = 0; \\ h(P_g, Q_g, P_{load}, Q_{load}) \leq 0 \\ (x_{i1} = 1, x_{i2} = 1, \dots, x_{iN} = 1)。 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_i 是第 i 条支路的运行状态,0 表示线路断开,1 表示投入运行; L_i 是第 i 条线路长度; n 是骨干网架中支路数量; $\varphi(x_1, x_2, \dots, x_N) = 1$ 表示对应系统满足连通性约束; $g(P_g, Q_g, P_{load}, Q_{load}) = 0$ 是潮流等式约束方程, $P_g, Q_g, P_{load}, Q_{load}$ 是骨干网架留存的发电机有功和无功输出以及负荷的有功和无功需求; $h(P_g, Q_g, P_{load}, Q_{load}) \leq 0$ 是潮流不等式约束方程; $x_{i1} \sim x_{iN}$ 是重要支路。

采用生物地理学优化算法(biogeography-based optimization algorithm, BBO)确定分级骨干网架,具体各级网架搜索方法参考文献[11]。要形成完备的分级骨干网架体系,首先需要确定 1 级负荷、电源和支路,根据约束条件搜索出 1 级骨干网架,在此基础上添加 2 级负荷、电源和支路并搜索出符合条件的 2 级骨干网架,2 级骨干网架与原系统中其余设备共同构成 3 级骨干网架。

3 差异化建设投资成本计算

设备全生命周期成本(life cycle cost, L_{cc})是指在设备的整个生命周期内,包括设备开发、投产、运行维护、检修以及报废处理阶段所产生的一切费用的总和^[12-13]。不同于传统的全生命周期成本计算方法,构建骨干网架是在传统电网的基础上升级设备以提高其抗灾标准,因此相应成本只考虑“加强”成本。具体差异化投资成本计算如下:

$$L_{cc} = C_1 + C_0 + C_M + C_D。 \quad (2)$$

式中: C_1 是额外投资成本; C_0 是新增或加强设备的运行成本; C_M 是增加的检修及维护成本; C_D 是新增设备的回收处置成本。

3.1 额外投资成本

额外投资成本是相对于传统建设对线路,杆塔等设备升级改造带来的技术投资、设备采购、设备安装以及土地成本,其中线路成本占比最大,本文将其余的设备采购、设计以及土地成本等费用平均分配到线路成本中。另外,考虑到设备使用寿命,在研究周期内还有因为设备更换带来的二次投资,本文假设同一路段使用的线路型号不变。

$$C_1 = \sum_{i=1}^n L_i \times \left(\sum_{j=1}^{M_i} B_i \cdot (1+r)^{k_{ij}} - \sum_{j=1}^{m_i} b_i \cdot (1+r)^{k'_{ij}} \right) \quad (3)$$

式中: B_i 是差异化改造中第 i 条线路对应造价,单位为万元/km; M_i 是该路段线路在计算周期内更换次数; r 是资金年利率; k_{ij} 对应第 i 条线路第 j 次更换时距计算周期末的时间; m_i 是非差异化建设时该路段线路在计算周期内更换次数, b_i 是对应造价。

3.2 运行及检修维护成本

由于计算的是差异化建设的投资成本,所以这里的运行和检修维护成本是在传统建设的基础上因为骨干网架建设而带来的附加成本。其中运行成本 C_0 包括新增工作人员台班费、日常设备检查、线路损耗等费用;检修维护成本 C_M 包括设备周期性维护、线路巡检、预防性实验、故障零部件更换等费用,这两部分费用按差异化投资成本的百分比计算:

$$C_0 + C_M = K_1 \times C_1 \times \frac{(1+r)^K - 1}{r} \quad (4)$$

式中: K_1 是运行检修比例系数; K 是研究周期。

3.3 回收处置成本

回收处置成本包括设备退役时的处理成本、设备残值以及研究周期末设备的折旧值,具体为:

$$C_D = K_2 C_1 - \left[\sum_{i=1}^n L_i B_i \cdot \left(\frac{1-v}{T_i} \cdot t_i + v \right) \cdot (1+r)^{t_i} - \sum_{j=1}^n L_j b_j \cdot \left(\frac{1-v}{T_j} \cdot t_j + v \right) \cdot (1+r)^{t_j} \right] \quad (5)$$

式中:第1部分是设备退役时的处理成本, K_2 是处理系数;第2部分是设备未到退役期限的折旧值,由差异化建设的设备折旧值减去常规建设的设备折旧值,本文采用平均年限法折旧^[14], v 是设备残值率, T_i 是设备使用寿命, t_i 是到结算期时设备剩余使用年限, r 是资金年利率。

4 差异化规划效益

本文借鉴灾害经济学中的“有无对比”原则来计算差异化规划收益,具体为重大自然灾害期间因为抗灾性差异化建设而带来的“减损效益”,包括发电侧效益、电网侧效益和用户侧效益,其他隐性社会效益包括用户恐慌,社会影响等,相对于用户侧效益所占比例很小,这里不做具体研究计算。

4.1 发电侧效益

发电侧效益主要是指因差异化建设而保障严重灾害期间发电厂发出的电力能够正常上网,减少火电厂非计划停机、风电场弃风、核电站停堆等情况带来的经济效益:

$$B_g = \sum_{z=1}^{d_1} \phi_z \cdot \sum_{j=1}^{d_2} (\lambda_2 - \lambda_1) F_z G_j \quad (6)$$

式中: d_1 是抗灾等级(设传统的电网建设可抗30年一遇灾害,此时 $d_1=0$, $B_g=0$;可抗50年一遇灾害的抗灾等级 $d_1=1$;可抗100年一遇灾害的抗灾等级 $d_1=2$); d_2 是受保护的电源数量; F_z 是第 z 级灾害所造成的故障时间, G_j 是第 j 个电源的发电量, λ_1 和 λ_2 分别是发电企业的发电成本和上网电价, ϕ_z 是第 z 级灾害的年发生概率。

4.2 电网侧效益

电网侧效益主要是指各电力企业因差异化建设而在灾害期间保障电力售出以及避免线路抢修所带来的收益:

$$B_w = \sum_{z=1}^{d_1} \phi_z \cdot \left(\sum_{j=1}^{d_2} (\lambda_3 - \lambda_2) F_z G_j + \sum_{i=1}^n L_i C_{i-z} \right) \quad (7)$$

式中: λ_3 是售电电价; C_{i-z} 是具有 z 级抗灾标准的第 i 条线路故障后单位长度抢修费用; $d_1=0$ 时, $B_w=0$ 。

4.3 用户侧效益

随着社会发展,各类电力用户对持续供电的依赖性越来越强,因此停电在用户侧造成的影响愈加严重,而差异化建设能够将这种影响降到最低,通过减少用户赔偿带来经济效益。因此这部分效益以用户缺电损失进行计算,它与灾害概率、系统故障时间、负荷类型以及负荷量等因素有关。

本文首先采用用户调查法,得到灾害持续期间不同用户的单位停电损失与停电持续时间的关系,然后通过曲线拟合得出具体函数关系:

$$L_{s(p,q)} = f_{p,q}(t)。(8)$$

式中: $L_{s(p,q)}$ 是第 p 级负荷中的第 q 类用户所对应的单位负荷停电损失, t 是停电持续时间。

根据第 1 节中用户重要度分级,以用户调查得到的每级用户中各类负荷的年用电量在该级用户年总用电量的比重为权重系数,得到各级负荷单位停电损失与停电时间的关系(元/kW):

$$L_{as,p}(t) = \sum_{q=1}^{N_p} k_{p,q} \cdot L_{s(p,q)}(p=1,2,3)。(9)$$

式中: N_p 是第 p 级负荷中的负荷类数量; $k_{p,q}$ 是权重系数。

用户侧效益 B_u :

$$B_u = \sum_{z=1}^{d_1} \phi_z \cdot \sum_{p=1}^{d_{3-z}} D_p \cdot \int_{t=0}^{F_z} L_{as,p}(t)。(10)$$

式中: D_p 是第 p 级负荷的负荷量; d_{3-z} 是发生 z 级灾害时受保护的负荷等级,取值 1,2,3。

以上所计算的效益是分级骨干网架的年效益,考虑到资金利率并将研究周期内的投资总效益折算到研究周期末,得到分级骨干网架建设的总效益为:

$$B_{al} = (B_g + B_w + B_u) \cdot \frac{(1+r)^K - 1}{r}。(11)$$

式中: r 是资金年利率; K 是研究周期,本文中取 $K=100$ 。

4.4 分级骨干网架效益

基于差异化投资成本和效益分析,计算出分级骨干网架净收益 N_p 和收益成本比 E_p ,其中, N_p 用于反映分级骨干网架建设方案能否收回成本并盈利,收益成本比 E_p 用于反映规划方案的盈利能力,其值越大,说明分级骨干网架构建方案的盈利能力越强。

$$N_p = B_{al} - L_{CC} = B_{al} - (C_1 + C_0 + C_M + C_D)。(12)$$

收益成本比 E_p :

$$E_p = N_p / L_{CC}。(13)$$

5 算例分析

5.1 确定 3 级骨干网架

本文采用 MATLAB R2014b 编程。生物地理学优化算法具有收敛速度快,参数设置少等优点^[15-16],本文用其对 IEEE 118 节点系统进行分级骨干网架搜索。该系统包括 118 个节点和 179 条支路,预设部分重要支路、电源以及重要负荷集如表 1 所示。

表 1 设备等级

Table 1 The grades of equipment

等级	设备	
1 级	负荷	B7、B17、B33、B44、B48、B67、B83、B96
	电源	B12、B26、B49、B65、B69、B77
	支路	L26-30、L34-37、L30-38、L45-49、L38-65、L82-83

续表 1

等级	设备	
2 级	负荷	B2、B3、B4、B13、B14、B21、B28、B29、B35、B39、B41、B43、 B47、B50、B53、B60、B79、B86、B94、B117、B118
	电源	B8、B25、B27、B42、B34、B62
	支路	L25-27、L34-43、L49-51、L83-85

在搜索骨干网架之前需要知道各条支路长度,由于算例中只有支路阻抗而没有具体长度,本文综合文献 [8]和[14]的方法,以 Garver-6 系统的支路长度和阻抗比为基准,根据 IEEE-118 系统各支路的阻抗值计算支路长度。

按第 2 节所述方法搜索出 IEEE 118 节点系统的各级骨干网架设计的最优方案和次优方案如下图 2~3,其中蓝色部分为 1 级骨干网架,与红色部分共同构成 2 级骨干网架。

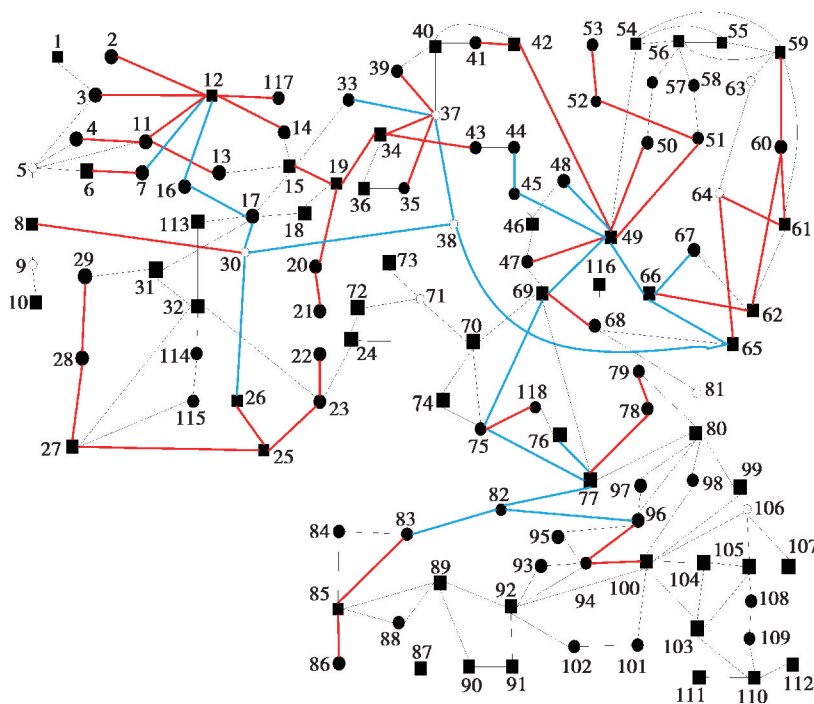


图 2 分级骨干网架最优方案

Fig. 2 Optimal scheme for graded backbone grid

具体数据统计如下表 2~3:

表 2 最优骨干网架统计数据

Table 2 Data of optimal backbone grid scheme

骨干网架	电源		负荷		线路	
	功率/MW	占比/%	功率/MW	占比/%	长度/km	占比/%
1 级	688.4	15.65	656	15.46	217.2	12.25
2 级	1 737.3	39.47	1 678	39.56	389.5	21.96
3 级	1 975.4	44.88	1 908	44.98	1 167.4	65.80
总和	4 401.1	100	4 242	100	1 774.1	100

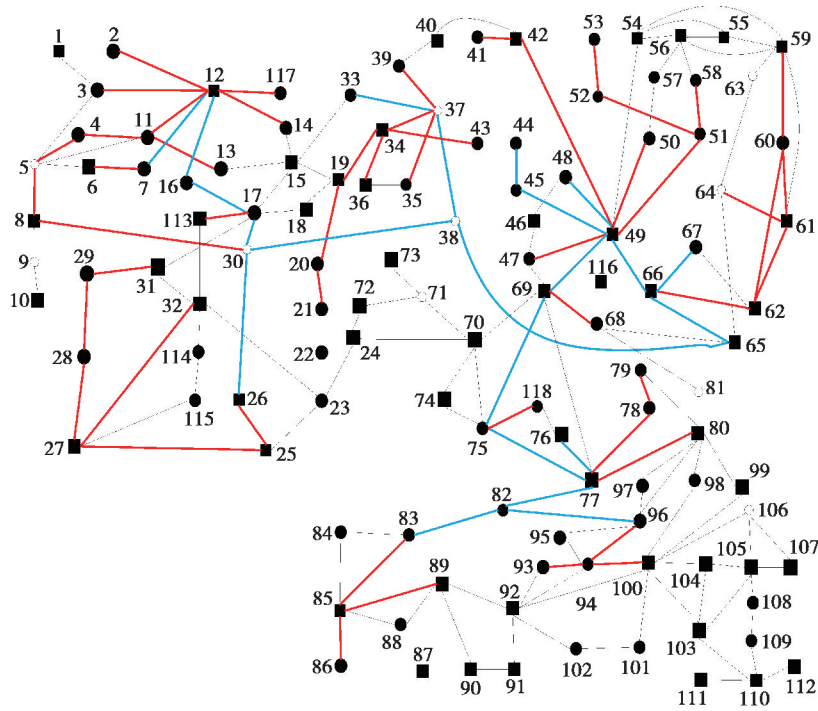


图 3 分级骨干网架次优方案

Fig. 3 Suboptimal scheme for graded backbone grid

表 3 次优骨干网架统计数据

Table 3 Data of suboptimal backbone grid scheme

骨干网架	电源		负荷		线路	
	功率/MW	占比/%	功率/MW	占比/%	长度/km	占比/%
1 级	688.4	15.65	656	15.46	217.2	12.25
2 级	1 702.3	38.68	1 587	37.41	406.7	22.92
3 级	2 010.4	45.68	1 999	47.12	1 150.2	64.83
总和	4 401.1	100	4 242	100	1 774.1	100

需要注意的是表 2 和表 3 中的 2 级骨干网架中各项数据不包括 1 级骨干网架对应项,同理 3 级骨干网架中数据不包括 1、2 级网架中的对应项。另外,对负荷的分级是根据其自身特性划分,不受骨干网架搜索的约束条件影响,而线路和电源的分级除了预先确定部分重要线路外,还有部分支路和电源是为了使各级骨干网架满足安全运行条件和连通性约束而添加,因此表 2~3 中的 2 级、3 级负荷是指该级骨干网架所覆盖的负荷,当计算分级骨干网架抗灾效益时,各个负荷的重要度等级应该依据表 1 进行计算(除表 1 中列举的 1、2 级负荷外,其余负荷都是 3 级负荷)。

图 2~3 中 1、2 级骨干网架都分别覆盖了对应等级的电源、负荷和线路,另外,为了保证各级骨干网架运行安全性和连通性,新增了部分节点(包括负荷节点)和支路。对比表 2 和表 3 中数据发现,最优方案中 2 级支路总长度比次优方案中 2 级线路长度更短,但是受保护的 2 级负荷却比次优方案多 91 MW,说明按最优方案设计的系统能够以更小的设备投资保障更多的重要负荷在自然灾害中持续供电,符合差异化规划的经济性要求,具体抗灾效益以 5.2 节计算为准。

5.2 分级骨干网架建设的经济性评估

本文中 3 级、2 级、1 级灾害分别为 30 年一遇,50 年一遇和 100 年一遇的灾害,假设电网基础建设的抗灾等级为抗 30 年一遇的自然灾害,设定基础网架为 3 级网架,差异化规划的 2 级、1 级骨干网架分别对应抗 50

年一遇和 100 年一遇的自然灾害,线路设计中一般不考虑抗灾强度大于 100 年一遇的设计标准。设各级灾害发生期间抗灾等级不足的线路均停运,具体关系如表 4。因此,分级骨干网架建设效益即发生严重度超过 30 年一遇的灾害时因保障系统正常运行而带来的效益。

表 4 各级灾害下的骨干网架运行情况

Table 4 Running state of backbone grids in disasters at different levels

灾害等级	骨干网架等级		
	3 级	2 级	1 级
3 级	运行	运行	运行
2 级	停运	运行	运行
1 级	停运	停运	运行

在计算分级骨干网架抗灾效益时,需要知道各级灾害年发生概率。本文以冰灾为例,采用区间概率方法计算出 50 年一遇和 100 年一遇灾害的年发生概率^[10,17],另外包括灾害持续时间、线路造价、线路寿命以及线路抢修费用等参数见表 5。

表 5 各级灾害计算参数

Table 5 Calculation parameters of disasters at different levels

灾害等级	灾害概率	持续时间/d	线路单位造价/(万元/km)	线路寿命/a ^[18]	线路抢修费用/(万元/km)
3 级			104.19	13	2
2 级	2/150	2	104.19×3	22	3
1 级	1/100	3	104.19×5	45	5

为了得到用户侧停电损失函数,采用用户调查法得到灾害持续期间不同用户的单位停电损失与停电持续时间的关系,为了简化计算本文使用各级负荷中的多个典型负荷代表当级负荷^[19-21],具体如表 6 所示。结合调查数据,对各类用户停电损失数据进行分段模拟,得到具体的评估模型,当停电时间大于 8 h,各类负荷度过过渡期,单位负荷停电损失趋于稳定,后续单位停电损失以停电达到 8 h 的单位损失为准,具体见表 7。

表 6 典型用户单位停电损失

Table 6 Unit outage losses of typical power users

负荷	代表	单位停电损失(元/kW)						用电量/%
		1 min	20 min	1 h	2 h	4 h	8 h	
1 级	政府机关	0.220	40.500	85.320	141.410	246.290	434.160	10
	医药卫生	45.500	75.600	159.980	431.930	826.370	1 300.750	15
	重要工业用户	537.300	1 243.292	1 625.586	2 018.136	2 119.137	2 304.161	75
2 级	小工业	63.401	139.836	247.530	409.071	707.705	1 176.994	60
	商业	1.905	14.845	42.760	90.617	156.585	415.040	40
3 级	农业	0.300	1.715	3.245	5.583	10.320	20.600	20
	居民用电	0.005	0.465	2.410	14.613	24.570	78.450	80

其余参数设置包括:资金年利率 r 为 5%,运行检修比例系数 K_1 为 1%,处理系数 K_2 为 5%,设备残值率 v 为 2%,发电成本 λ_1 为 100 元/(MW·h),上网电价 λ_2 为 300 元/(MW·h),售电电价 λ_3 为 500 元/(MW·h)。

表 7 典型用户停电损失评估模型

Table 7 Outage loss evaluation model for typical power users

用户	单位停电损失模型
政府机关	$y = \begin{cases} 83.6x + 4.4 & 0 < x < 1 \\ 49.6x + 41 & 1 \leq x < 8 \\ 434.2 & 8 \leq x \end{cases}$
医药卫生	$y = \begin{cases} 203x + 9.5 & 0 < x < 4 \\ 118.6x + 352 & 4 \leq x < 8 \\ 1\ 300.8 & 8 \leq x \end{cases}$
重要工业用户	$y = \begin{cases} 1\ 024.4x + 674.4 & 0 < x < 1 \\ 392.6x + 1\ 233 & 1 \leq x < 2 \\ 47.5x + 1\ 925.6 & 2 \leq x < 8 \\ 2\ 304.2 & 8 \leq x \end{cases}$
小工业	$y = \begin{cases} 183.3x + 67.8 & 0 < x < 1 \\ 131.6x + 142 & 1 \leq x < 8 \\ 1\ 177 & 8 \leq x \end{cases}$
商业	$y = \begin{cases} 39.2x + 3.7 & 0 < x < 4 \\ 64.6x - 101.9 & 4 \leq x < 8 \\ 415 & 8 \leq x \end{cases}$
农业	$y = \begin{cases} 2.5x + 0.6 & 0 < x < 8 \\ 20.6 & 8 \leq x \end{cases}$
居民用电	$y = \begin{cases} 6.6x - 1.3 & 0 < x < 4 \\ 13.5x - 29.3 & 4 \leq x < 8 \\ 78.5 & 8 \leq x \end{cases}$

对各个等级的设备加强为不同等级的抗灾标准,然后用本文提出的计算方法进行效益评估,具体差异化规划方案设计如下:

方案 1:按图 2 中最优方案设计 3 级骨干网架,分别对应抗 30 年一遇、50 年一遇和 100 年一遇灾害。

方案 2:按图 3 中次优方案设计 3 级骨干网架,分别对应抗 30 年一遇、50 年一遇和 100 年一遇灾害。

方案 3:分 2 级骨干网架,将图 2 中 1、2 级支路按抗 50 年一遇灾害的抗灾标准设计,其余部分按基础标准(抗 30 年一遇)设计。

方案 4:系统设备全部按抗 50 年一遇自然灾害的标准设计。

方案 5:系统设备全部按抗 100 年一遇自然灾害的标准设计。

将各个方案所需的差异化投资成本、抗灾效益和净收益统计如表 8 所示。

表 8 各种方案经济性评估结果

Table 8 Economic evaluation results of various schemes

加强标准	L_{cc} /亿元	B_{al} /亿元	N_p /亿元	E_p
方案 1	63 366.6	67 089.9	3 723.3	0.058 8
方案 2	64 914.8	65 864.5	949.7	0.014 6
方案 3	54 626.3	55 399.1	772.8	0.014 1
方案 4	159 742.1	59 343.9	-100 398.2	-0.628 5
方案 5	231 124.4	97 399.6	-133 724.8	-0.578 6

对比方案 1 和方案 2,方案 1 以更小的投资成本实现了更大的抗灾效益,其研究周期内的净收益是方案 2 的 4 倍左右,证明了本文所提分级骨干网架构建方法的合理性。另外对比方案 1 和方案 3 发现,虽然方案 3 的投资成本更低,但是其周期内净收益也远低于方案 1,且收益成本比只是方案 1 的四分之一,说明与只差异化构建 1 级核心骨干网架相比,分级骨干网架依靠更精细的等级划分可以根据灾害严重程度选择性保障重要设备的输配电需求而实现更大的收益投资比。而方案 4 和方案 5 因为没有考虑到负荷和发电机的重要性差异而将系统整体的抗灾性提升,严重增加了投资成本,但是重大自然灾害的年发生概率太低,绝大多数设备的抗灾能力并没有得以体现,最终导致入不敷出,进一步证明了将系统电源和负荷等进行分级并构建分级骨干网架的必要性和可行性。

6 结 论

1) 本文对电源、负荷和线路按故障或断电损失进行重要度分级,然后从经济性角度出发,以抗灾性建设所加强的支路长度最短为目标函数,提出了分级骨干网架的构建方法,并以 IEEE 118 节点系统为例搜索出各级系统可以独立稳定运行的骨干网架体系。

2) 以设备全寿命周期成本理论为基础,考虑设备寿命,提出了对电网进行分级骨干网架建设所需投资的计算方法;基于用户调查法构建发电侧、电网侧和用户侧停电损失函数模型,提出差异化建设抗灾效益的计算方法。对 IEEE 118 系统中骨干网架设计多种抗灾建设方案,通过投资成本和收益的对比,证明了设计分级骨干网架的经济性和抗灾效益计算方法的可行性。

3) 随着经济增长和用户持续供电依赖程度的增加,单位失负荷的赔付款会逐年上升,因此差异化规划效益会更加明显。另外,本文主要考虑了冰灾影响,但是其他地震、台风等自然灾害也会给电网运行带来较大影响,提升电网抗灾性也会带来这方面的抗灾效益。

参考文献:

- [1] 侯慧,尹项根,陈庆前,等.南方部分 500kV 主网架 2008 年冰雪灾害中受损分析与思考[J].电力系统自动化,2008,32(11):12-15,38.
HOU Hui, YIN Xianggen, CHEN Qingqian, et al. Review on the wide area blackout of 500 kV main power grid in some areas of south China in 2008 snow disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 12-15, 38. (in Chinese)
- [2] Deblasio R, Tom C. Standards for the smart grid[C]//Proceedings of IEEE Energy 2030 Conference, 2008, Atlanta, GA, USA, IEEE, 2008: 1-7.
- [3] Trudel G, Gingras J P, Pierre J R. Designing a reliable power system: hydro-quebec's integrated approach[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5):907-917.
- [4] 黎灿兵,梁锦照.电网差异化规划新方法[J].电力系统自动化,2009,33(24):11-15.
LI Canbing, LIANG Jinzhao. A novel method of power grid differential planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 11-15. (in Chinese)
- [5] 洪运福.基于复杂网络的输电网差异化规划研究[D].保定:华北电力大学,2012.
HONG Yunfu. Transmission network differential planning based on complex network theory[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2012.
- [6] 赵一婕,刘涤尘,吴军,等.基于线性判别分析与主成分分析的骨干网架生存性评估方法[J].电网技术,2014,38(2):388-394.
ZHAO Yijie, LIU Dichen, WU Jun, et al. Survivability evaluation of backbone network based on linear discriminant analysis and principal component analysis[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 388-394. (in Chinese)
- [7] 彭显刚,林利祥,翁奕珊,等.基于模糊综合评判和综合赋权的抗灾型配电网骨干网架规划[J].电力系统自动化,2015,39(12):172-178.
PENG Xiangang, LIN Lixiang, WENG Yishan, et al. Decision-making method for anti-disaster distribution network backbone upgrade based on fuzzy comprehensive evaluation and comprehensive weights[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 172-178. (in Chinese)

- [8] 宋春丽, 刘涤尘, 吴军, 等. 考虑气象因素的电网差异化规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(12): 1-6.
SONG Chunli, LIU Dichen, WU Jun, et al. Differential power network planning considering weather factors [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(12): 1-6. (in Chinese)
- [9] 李隽, 罗金山, 吴军, 等. 基于电网差异化规划原则分析的核心骨干网架构建方法研究[J]. 陕西电力, 2013, 41(12): 8-14, 19.
LI Jun, LUO Jinshan, WU Jun, et al. Construction method of core backbone network frame based on power grid differential planning principle analysis [J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(12): 8-14, 19. (in Chinese)
- [10] Yang W H, Bi T S, Huang S F, et al. Identification of backbone-grid in power grid based on binary particle swarm optimization [C] // International Conference on Power System Technology, October 24-28, 2010, Hangzhou, China. IEEE, 2010: 1-6.
- [11] 董飞飞, 刘涤尘, 吴军, 等. 基于改进 BBO 优化算法和电网生存性的核心骨干网架构建[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2659-2667.
DONG Feifei, LIU Dichen, WU Jun, et al. A method of constructing core backbone grid based on improved BBO optimization algorithm and survivability of power grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2659-2667. (in Chinese)
- [12] Yusni A, Nugraha H, Sinisuka N I. Life cycle management on the operation of 400 MW power generation [C] // 2018 International Conference on Information and Communications Technology, March 6-7, 2018, Yogyakarta, Indonesia. IEEE, 2018: 838-843.
- [13] Kishore T S, Singal S K. Development of generic life cycle costing model for analysis of power transmission lines [C] // International Conference on Science Engineering and Management Research, November 27-29, 2014, Chennai, India. IEEE, 2014: 1-5.
- [14] 苏海峰, 张建华, 梁志瑞, 等. 基于 LCC 和改进粒子群算法的配电网多阶段网架规划优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 118-125.
SU Haifeng, ZHANG Jianhua, LIANG Zhirui, et al. Multi-stage planning optimization for power distribution network based on LCC and improved PSO [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 118-125. (in Chinese)
- [15] Ovreiu M, Simon D. Biogeography-based optimization of neuro-fuzzy system parameters for diagnosis of cardiac disease [C] // Conference on Genetic and Evolutionary Computation. Portland, USA: ACM, 2010: 1235-1242.
- [16] Gupta S, Arora A, Panchal V K, et al. Extended biogeography based optimization for natural terrain feature classification from satellite remote sensing images [C] // International Conference on Contemporary Computing IC3 2011. Berlin: Springer, 2011: 262-269.
- [17] 钟佑明, 吕恩琳, 王应芳. 区间概率随机变量及其数字特征[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2001, 24(1): 24-27.
ZHONG Youming, LV Enlin, WANG Yingfang. Interval probability random variable and its numerical characters [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2001, 24(1): 24-27. (in Chinese)
- [18] 张勇军, 黄慧, 唐捷. 基于非序贯蒙特卡罗冰灾重现期线路经济性比较[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 119-123.
ZHANG Yongjun, HUANG Hui, TANG Jie. Economy comparison of line's ice disaster cycle based on non-sequential Monte Carlo [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 119-123. (in Chinese)
- [19] Jonnavithula A, Billinton R. Features that influence composite power system reliability worth assessment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(4): 1536-1541.
- [20] 周莉梅, 范明天. 城市电网用户停电损失估算及评价方法研究[J]. 中国电力, 2006, 39(7): 70-73.
ZHOU Limei, FAN Mingtian. Research on customer outage cost assessment and its evaluation method in urban electric power network [J]. Electric Power, 2006, 39(7): 70-73. (in Chinese)
- [21] 李蕊. 配电网可靠性与重要电力用户停电损失研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2010.
LI Rui. The study on economics evaluation of distribution system reliability with consideration of important power users [D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2010. (in Chinese)