

DOI: 10.7667/PSPC160046

新型交直流混合微电网结构设计

蔡冰倩, 贾利虎, 朱永强, 王银顺

(新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 结构设计关系到交直流混合微电网的建设成本和运行性能。对交流微电网、直流微电网的典型结构进行了比较全面的对比分析。根据微电网的分区原则、分层原则、资源利用最大化原则、电能质量保证原则, 设计了交直流混合微电网的3种拓扑结构, 分别为多层型、单环型以及互补环型结构。利用微电网可靠性和经济性的分析方法及参考数据, 对比了3种拓扑的系统可靠性指标和建设成本、运行维护费用等经济性指标, 得出其各自的优缺点和适用场合。

关键词: 交直流混合微电网; 设计原则; 结构设计; 可靠性分析; 经济性分析

New architecture design for hybrid AC/DC micro-grid

CAI Bingqian, JIA Lihu, ZHU Yongqiang, WANG Yinshun

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Structure design will affect the construction cost and operation performance of hybrid AC/DC micro-grid. This paper takes an overall contrastive analysis on the typical structures of AC micro-grid and DC micro-grid. According to the partition principle, hierarchical principle, maximum resource utilization principle and the principle of electric energy quality assurance in micro-grids, three topological structures for hybrid AC/DC micro-grid are designed, which are multilayer type, single loop type and complementary loop structure. Using analytical method for reliability and economy and reference data in micro-grid, this paper compares the three new topologies on system reliability index and economic index such as construction cost, operation and maintenance cost and so on. Each structure's characteristics and application are given.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050102) and Chinese-Danish Intergovernmental Science and Technology Collaboration Program "Intelligent DC Microgrid Design and Empirical Cooperation Study" (No. 2014DFG72620).

Key words: hybrid AC/DC micro-grid; design principle; architecture design; reliability analysis; economic analysis

0 引言

微电网是解决未来电网发展中诸多问题的有效途径, 它是由分布式的电源、负荷、储能系统、无功补偿装置、电力变换装置和监控保护系统组成的一个具有自我控制和自我管理的自治系统。微电网具有以下优点: 提高配电网对分布式电源的接纳能力; 提高可再生能源的利用效率; 有效降低配电网的网络损耗; 在配电网故障时, 能够保障重要负荷

供电; 另外, 在海岛、农村发展微电网, 可以有效解决当地供电难等问题^[1-2]。

文献[3]从微电网的结构设计、运行控制、供电可靠性和电能质量、经济运行与安全机制、仿真平台和示范工程5个方面, 对微电网的最新进展和关键技术进行了详细的探讨。文献[4]中分析了各种典型微电网的结构特点、适用范围, 结合负荷和电源容量匹配原则、地理因素、接入点配电网结构、运行方式等方面的因素, 研究了微电网结构设计方法。文献[5]指出交直流混合微电网综合了交流微电网和直流微电网的优点, 并且提出了适合我国优质电力园区供电需求的交直流混合微电网的技术方案。

基于对大量典型微电网结构的调研和分析, 本

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2015AA050102); 中国-丹麦政府间科技合作项目“智能直流微电网设计与实证合作研究”(2014DFG72620)

文依据微电网结构设计原则(包括分区原则、分层原则、资源利用最大化原则、电能质量保证原则等),设计了交直流混合微电网的3种新型拓扑结构,并从可靠性和经济性方面对其进行了对比分析,得出了其各自的适用范围及优缺点。

1 典型微电网结构

1.1 交流微电网结构

交流微电网大多采用辐射状的网架结构^[6]。例如图1所示的交流微电网结构,有4条馈线和2条母线,在PCC点与其他电网相连,PCC点的断路器可实现微电网的孤岛或并网运行。每个微电源出口处都配有断路器、功率与电压控制器,当配电网出现故障时,断路器动作,微电网转入孤岛运行模式,一般能保证微电网内重要负荷不间断供电。

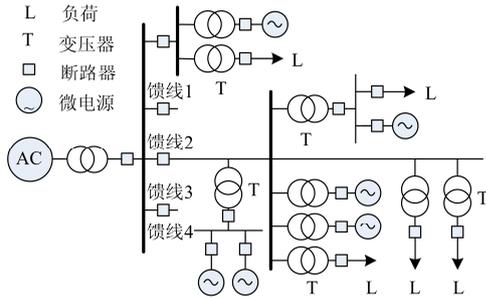


图1 辐射型交流微电网结构

Fig. 1 Radial type structure of AC micro-grid

1.2 直流微电网结构

直流微电网不存在频率和同步性问题,随着城市配电网的发展和直流用电负荷的增多,直流电网获得了较快发展。根据用户对用电质量的不同要求,近些年来出现了环型、辐射型、馈线型等几种典型的直流微电网结构^[7],但是目前都处于小规模工程试验阶段。

图2为环型直流微电网拓扑,其主干线路完全采用直流,分布式电源和交直流负荷通过电力电子变换器接入直流母线(或线路),直流微电网通过若干双向变流器与交流大系统连接在一起。小型低压直流微电网通过直流变压器接入中压直流母线。环型结构的优点是供电可靠性较高,缺点是故障识别及保护控制配合相对困难。

图3为放射型直流微电网,直流微电网通过一个双向变流器与交流大电网相连,各分布式电源和负荷都直接或间接连接在一条直流母线上,然后再通过DC/DC变流器将不同电压等级的母线连接在一起。放射状结构故障识别及保护控制配合相对容易,供电可靠性较低。

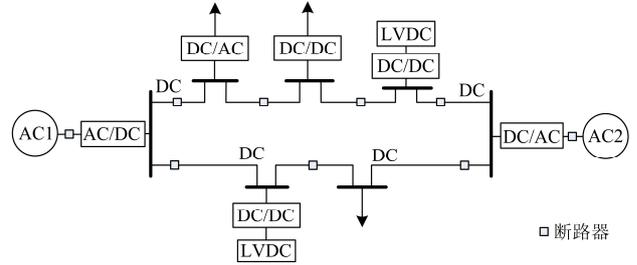


图2 环型直流微电网结构

Fig. 2 Loop structure of DC micro-grid

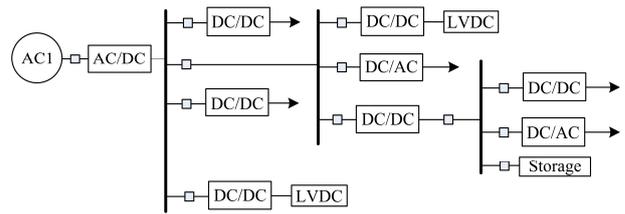


图3 放射型直流微电网结构

Fig. 3 Radial type structure of DC micro-grid

图4为馈线型直流微电网,与环型结构不同的是,没有形成环网;与放射型结构不同的是,网架结构为简单的串联形式,通过双向变流器与交流系统相连。该类型直流微电网适合于偏远地区,优点是系统设计简单,运行控制较环型、放射型容易,故障识别及保护控制配合相对简单;缺点是供电可靠性较差。

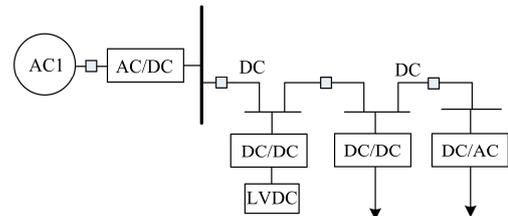


图4 馈线型直流微电网结构

Fig. 4 Feeder type structure of DC micro-grid

2 结构设计原则

交直流混合微电网的规划设计,应以电网的安全稳定运行为前提,同时满足供电可靠性、经济性和灵活性的要求^[8-9],并最大化整合利用微电网范围内的多种能源,并进一步对微电网在不同场景下的应用进行细分研究。本文后面的结构设计是基于作者在文献[10]中提出的微电网结构设计的基本原则,包括:分区原则、分层原则、资源充分利用原则和电能质量保证原则。

(1) 分区原则

分区原则是指按照负荷和分布式电源的容量大小及分布情况,对两者所在电网位置进行分区,

以减少线路上的能量流动, 满足经济性要求^[11]。在负荷容量较小或密度较低的区域, 可设置合适的分布式电源与之搭配, 就地解决用电问题; 在负荷较大或电源密度较高的区域, 采用电源和负荷组建局部小系统的方式, 减少电力电子变换器的使用; 对于工厂等重负荷区, 本地分布式电源远远不能满足其能量需求, 供电可靠性不能保证, 此时最好将微电网与大电网的并网点设置在重负荷区附近。

(2) 分层原则

分层原则是指根据负荷和电源情况, 选择微电网中的母线电压等级。对已存在的负荷区域进行分析, 相同电压等级的负荷最好设置在相邻区域, 这样区域内部电源之间可以互为备用, 提高供电可靠性。例如文献[12]指出对于商业用户 400 V 是一个比较理想的电压等级。

(3) 资源充分利用原则

资源充分利用原则是指可再生能源的最大化利用和不同类型能源的互补利用: 在对当地可再生能源进行充分调研分析的基础上, 为其制定有效的发电方案, 使得资源得以最大化利用; 将两种资源连接在同一电压等级的馈线上, 使在某段时间供应充足的资源与在另一段时间供应充足的资源形成互补作用, 或者使同一时刻不同区域的微电网资源互为补充。

(4) 电能质量保证原则

电能质量保证原则是指在满足经济性指标和系统运行性能指标的前提下, 为满足电能质量要求, 在交直流混合微电网中配置储能装置和无功补偿装置。其中储能配置可以在紧急情况下作为应急电源向配电网提供功率, 或者在故障情况下保证微电网内部重要负荷的不间断供电, 降低停电频率, 保证供电可靠性。另外, 微电网内部的变压器、异步电动机等感性负载, 以及大量使用的电力电子变换器等非线性设备, 正常运行时会消耗一定的无功功率, 因此微电网内部需配置合理的静态和动态无功补偿设备。

3 新型拓扑结构设计

单纯的交流微电网或直流微电网的拓扑结构研究已相对成熟, 而交直流混合微电网拓扑结构的研究则相对较少。本文在充分考虑上述设计原则的基础上, 给出了交直流混合微电网的 3 种拓扑结构: 多层结构、单环结构和交直流互补环型结构。

(1) 多层结构

图 5 为多层型交直流混合微电网, 通过变压器与大电网相连, 其外层为交流环网, 交流环网节点处的多个分支分别通过变压器或者变流器与不同电

压等级的交流微电网或者直流微电网相连; 内层微电网将分散于不同区域的 DG 和负荷连接起来。分析图 5 可知, 多层结构具有以下特点:

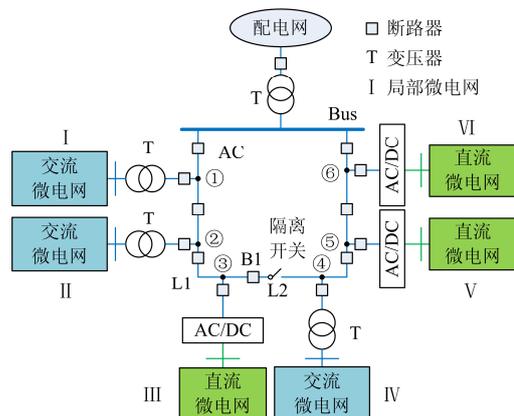


图 5 多层型交直流混合微电网

Fig. 5 Multilayer type of hybrid AC/DC micro-grid

1) 交流环网上的每个节点都是由两路电源进行供电。通过两条线路上断路器的倒闸操作, 可以在保证连续供电的前提下对线路轮流检修。当单条供电线路故障时, 也能使负荷迅速恢复供电。例如当线路 L2 出现故障时, 通过操作断路器 B1, 可使节点 3 不受 B1 右侧故障源影响, 而继续通过线路 L1 进行供电, 从而缩小停电范围, 降低系统平均停电持续时间和用户平均停电持续时间。

2) 相邻的小型微电网之间互为备用。当其中一个微电网内部主电源出现故障时, 相邻的小型微电网可以通过它们之间的联络线路给故障微电网中的重要负荷供电。例如当小型微电网 II 内部的主电源出现故障时, 小型微电网 III 可以通过联络线路 L1 对 II 进行供电。

3) 扩展性较好。微电网节点较多, 适宜电源和负荷的接入。例如小型微电网 I、II 等处于交流环网的外部, 有助于在更大范围内配置电源、增添负荷, 也可以与其他新建微电网进行互联, 增加微电网的供电备用, 也便于电网扩建。

(2) 单环结构

单环型交直流混合微电网如图 6 所示, 与多层结构不同的是, 其交流环网上的节点分支上接入的是分布式电源(DG)或者负荷。

分析图 6 可知: 若相邻的两个分支的电压等级相同, 则可通过联络线路将两者进行连接, 这样相邻分支可以互为备用。例如对于微电源 D1、负荷 D2, 正常运行时, 联络断路器 B1 处于关断状态, 当节点 2 处的变压器出现故障时, 可通过联络线 L 对 D2 进行供电, 保证 D2 的可靠用电。

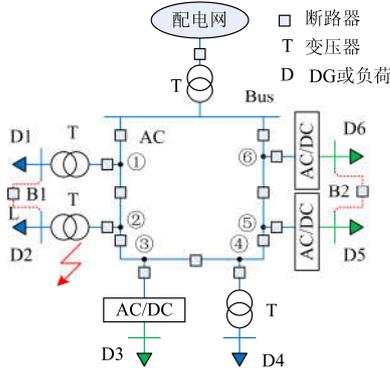


图 6 单环型交直流混合微电网

Fig. 6 Single-loop type of hybrid AC/DC micro-grid

(3) 交直流互补环型结构

交直流互补环型交直流混合微电网如图 7 所示。系统中同时存在交流微电网和直流微电网，配电网 AC1、AC2 通过双向 AC/DC 变流器与中压直流微电网相连，通过交流断路器与中压交流微电网相连。低压交直流微电网分别通过升压变压器、直流变压器与中压交、直流微电网线路相连。

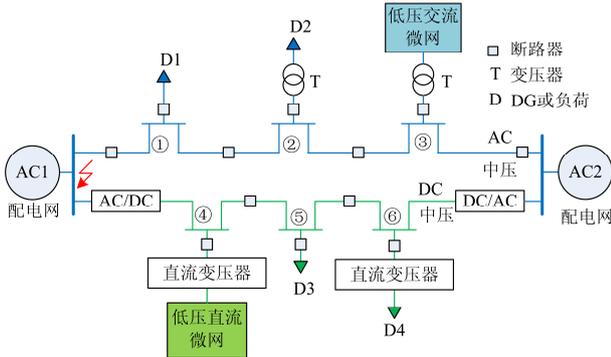


图 7 交直流互补环型交直流混合微电网

Fig. 7 AC/DC complementary loop type of hybrid AC/DC micro-grid

分析图 7 可知：交、直流微电网互为备用，当一方的供电电源出现故障时，另外一方可通过双向变流器对无故障部分进行供电。例如，当配电网 AC1 出口侧母线出现故障时，在发电容量够用的前提下，直流微电网可以通过双向 DC/AC 变流器给交流微电网中没有故障的部分供电，降低了系统的平均停电时间。

4 3 种新型拓扑结构的对比分析

4.1 可靠性分析

参照含有微电网的配电网供电可靠性分析方法^[13]，对 3 种新型拓扑结构进行网络等值简化，计算出各自的系统可靠性指标，并对其进行对比分

析，可较为准确地反映 3 种交直流混合微电网拓扑结构的可靠性。

(1) 可靠性评估方法

鉴于 3 种新型拓扑结构中均含有环形或并联结构，若拓扑结构中的两个模块 a、b 为并联关系(每个模块由多个元件构成)，则模块 a、b 并联后的并联模块可靠性参数可按式(1)计算，其中 λ_p 、 r_p 、 U_p 依次为并联模块的年故障停运频率、平均停电持续时间和年平均停运持续时间。

$$\begin{cases} \lambda_p = \lambda_a \cdot \lambda_b \cdot (r_a + r_b) \\ r_p = r_a \cdot r_b / (r_a + r_b) \\ U_p = \lambda_p \cdot r_p \end{cases} \quad (1)$$

式中： λ_a 、 λ_b 分别为模块 a、模块 b 的年故障停运频率； r_a 、 r_b 分别为模块 a、模块 b 的平均停电持续时间。

假设微电网处于理想状态，则可按式(2)计算出负荷点的可靠性参数，其中 λ_l 为负荷点 l 的年故障停运频率，次/年； r_l 为负荷点 l 的平均停电持续时间，h/次； U_l 为负荷点 l 的年平均停运持续时间，h/年。

$$\begin{cases} \lambda_l = \sum_{i \in f} \lambda_i \\ r_l = U_l / \lambda_l \\ U_l = \sum_{i \in f} \lambda_i r_i \end{cases} \quad (2)$$

式中： f 为造成负荷点停电的所有元件的集合； λ_i 为 f 内元件 i 的年故障停运频率； r_i 为 f 内元件 i 的平均停电持续时间； U_i 为 f 内元件 i 的年平均停运持续时间。

将式(2)代入式(3)可得出交直流混合微电网的系统可靠性参数^[14-15]，其中 SAIFI 为年平均停电频率，次/(户·年)；SAIDI 为系统年平均停电持续时间，h/(户·年)；ASAI 为平均供电可用指标，%；ENS 为系统缺供电量指标，kWh/年。

$$\begin{cases} SAIFI = \sum \lambda_l N_l / \sum N_l \\ SAIDI = \sum U_l N_l / \sum N_l \\ ASAI = (\sum 8760 N_l - \sum r_l N_l) / \sum 8760 N_l \\ ENS = \sum L_{al} r_l \end{cases} \quad (3)$$

式中： N_l 为负荷点 l 的用户数； L_{al} 为负荷点 l 的平均负荷数。

(2) 系统可靠性参数的计算与分析

按照“分块形成的最短路算法”对交直流混合微电网的 3 种新型拓扑结构进行等值简化^[16]，可得出其网络等值简化图，见图 8—图 10。根据图 8—图 10，将表 1 所示的交直流混合微电网中常见

元件的故障参数代入式(2)^[17-19], 可得出每个拓扑结构的各个负荷点的可靠性参数。假设所有负荷点的 N_f 均相同, 则可由式(3)计算出 3 种新型拓扑结构的系统可靠性指标, 见表 2。

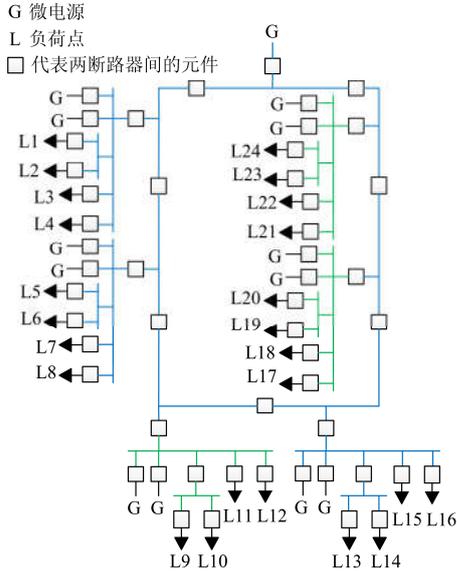


图 8 多层结构的网络等值简化图

Fig. 8 Equivalent simplification diagram of multilayer structure

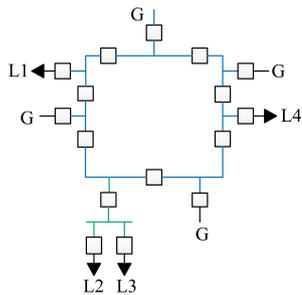


图 9 单环结构的网络等值简化图

Fig. 9 Equivalent simplification diagram of single-loop structure

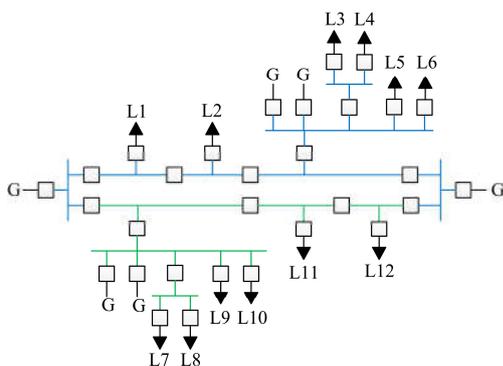


图 10 交直流互补环型结构的网络等值简化图

Fig. 10 Equivalent simplification diagram of AC/DC complementary loop structure

表 1 交直流混合微电网中常见元件的可靠性参数

Table 1 Reliability parameters of common elements in hybrid AC/DC micro-grid

元件	电压等级/kV	故障率/(次/年)	修复时间/h	更换备用时间/h
交/直流母线	~10、±7.5	0.001 0*	2	—
交流断路器	10	0.006 0	4	—
交流变压器	~10/~0.22	0.015 0	200	10
直流断路器	±7.5	0.299 9	—	10
逆变器	±0.2/~0.22	0.004 8	26	—
整流器	~0.22/±0.2	0.004 5	16	—
换流器	±7.5	0.023 7	2.55	—
直流变压器	±7.5/±0.2	0.419 1	—	10

注: 带*的表示 1 km 的故障率。

表 2 3 种新型拓扑结构的系统可靠性指标

Table 2 System reliability index of three new topological structures

可靠性指标	多层结构	单环结构	交直流互补环型结构
SAIFI	0.391 5	0.291 9	0.577 4
SAIDI	7.952 0	6.389 0	5.325 1
ASAI	99.26	99.23	99.42
ENS	155 047	26 909	60 563

分析表 2 可知, 多层结构的 SAIDI 和 ENS 最大、其他两个指标居中, 交流环网的每个节点分支处所接均为微电网, 系统的拓扑结构较为复杂、节点较多, 相应的故障点也较多, 因此其可靠性较低。这种结构多用于供电范围广、负荷供电可靠性要求相对较低的地区。

单环结构 SAIFI 和 ENS 最小、ASAI 也最小、SAIDI 居中, 其交流环网的节点分支上直接接入的是 DG 和负荷, 减少了中间设备的使用, 电网结构相对简单、节点数也较少、规模较小, 相应的故障点也较少, 与另外两种结构相比可靠性较高。但交流环上的有限节点数也限制了其供电容量和距离。因此单环结构一般适合供电范围小、供电容量需求低的地区。

交直流互补环型结构的 ASAI 最大、其他 3 个指标居中, 由于其交、直流馈线上所接 DG 和负荷的交直流性质分明, 减少了变流器的使用, 提高了系统可靠性, 但直流设备的高故障率又降低了其可靠性, 因此这种拓扑结构一般仅适用于不同性质 DG 和负荷分布的较为集中的地区。

3 种新型拓扑结构的适用范围如表 3 所示。

表 3 3 种新型拓扑结构的适用范围

Table 3 Application of three new topological structures

新型拓扑结构名称	适用范围
多层结构	DG、负荷的密度较大
单环结构	DG、负荷的密度较小
交直流互补环型结构	不同性质 DG、负荷的分布集中

4.2 经济性分析

经济性也是评价微电网结构是否具有工程价值的关键因素。由于微电网中的很多分布式电源具有波动性和间歇性的特点,使其经济性分析所涉及参数较多,分析过程较为复杂。为了减少工作量,本文仅从投资成本和运行维护费用这两个重要影响因素着手^[20],分析 3 个新型拓扑结构的经济性。

1) 经济性分析方法

(1) 投资成本

交直流混合微电网的投资成本是指其一次投入的建设费用,主要包括交/直流输电线、交/直流断路器、交流变压器、变流器等一次设备的购买成本,见表 4,将其代入式(4)可计算出微电网的投资成本 C_{inv} 。

表 4 交直流混合微电网中常见设备的投资成本

Table 4 Investment of the common equipment in AC/DC hybrid micro-grids

设备名称	单位造价	数量	总价
交流输电线	m_{cab_i1}	L_{ac_i1}	$C_{cab_ac}=\sum m_{cab_i1}L_{ac_i1}$
直流输电线	m_{cab_i2}	L_{dc_i2}	$C_{cab_dc}=\sum m_{cab_i2}L_{dc_i2}$
交流断路器	m_{bre_i3}	m_{ac_i3}	$C_{bre_ac}=\sum m_{bre_i3}m_{ac_i3}$
直流断路器	m_{bre_i4}	m_{dc_i4}	$C_{bre_dc}=\sum m_{bre_i4}m_{dc_i4}$
交流变压器	m_{trf_i5}	n_{ac_i5}	$C_{trf}=\sum m_{trf_i5}n_{ac_i5}$
变流器	m_{con}	P_{con}	$C_{con}=m_{con}P_{con}$

$$C_{inv} = C_{cab_ac} + C_{cab_dc} + C_{bre_ac} + C_{bre_dc} + C_{con} + C_{trf} \quad (4)$$

式中: C_{cab_ac} 、 C_{cab_dc} 分别为交、直流输电线总价, C_{bre_ac} 、 C_{bre_dc} 分别为交、直流断路器总价; C_{trf} 、 C_{con} 分别为交流变压器、变流器总价。

(2) 运行维护费用

交直流混合微电网的运行维护费用是指微电网在正常运行时每年所支出的费用,主要包括线路损耗、变压器损耗、变电站损耗和变流器损耗等能耗损失成本以及微电网的维护成本。

交/直流输电线的损耗可按式(5)计算求出。

$$\begin{cases} \Delta P_{ac} = 3I_{ac}^2 \cdot R_a = 10^6 \sqrt{3} \sum \rho L J (1 + k_{ac}) \frac{P_{ac}}{U_{ac}} \\ \Delta P_{dc} = I_{dc}^2 \cdot R_d = 10^6 \sum \rho L J \frac{P_{dc}}{U_{dc}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: ΔP_{ac} 为交流输电线的有功功率损耗, kW; ρ 为电阻率, $\Omega \cdot m$; L 为输电距离, km; J 为经济电流密度, A/mm^2 ; k_{ac} 为额外损耗系数; P_{ac} 为交流线路输送的有功功率, kW; U_{ac} 为交流输电线的线电压有效值, kV; ΔP_{dc} 为直流输电线的功率损耗, kW; P_{dc} 为直流线路的输电容量, kW; U_{dc} 为直流输电线路电压, kV。

交流变压器的损耗率 η_{trf} 与其容量、负载系数等参数有关。国标 1094-1 规定变压器总损耗偏差不超过 10% 左右,其中中压变压器损耗率一般在 1%~2.5% 之间变化。若单个交流变压器的输送容量为 P_{trf} , 则其总损耗 ΔP_{trf} 计算为

$$\Delta P_{trf} = \sum P_{trf} \cdot \eta_{trf} \quad (6)$$

变流器包括换流器、整流器和逆变器,其损耗率 η_{con} 与其电压等级、变换容量等参数有关,一般小于 10%。因此,若每个变流器的输送容量为 P_{con} , 则其总损耗 ΔP_{con} 计算为

$$\Delta P_{con} = \sum P_{con} \cdot \eta_{con} \quad (7)$$

根据电力工业部颁布的《电网建设项目经济评价暂行方法》,当无统计值时,维护成本系数 k (维护成本与固定资产原值的比值)可控制在固定资产原值的 1% 左右。鉴于交直流混合微电网的众多不确定因素,取 $k=1.5\%$ 。此时微电网的维护成本 C_m 计算为

$$C_m = 1.5\% \cdot C_{inv} \quad (8)$$

若设电价为 C_{ev} , 则可根据线路损耗、变压器损耗和变电站损耗计算出交直流混合微电网的年运行费用 C_{opr} , 如式(9), 进而由式(10)计算出系统的运行维护费用 C_{opr_m} 。

$$C_{opr} = 8760 \cdot (\Delta P_{ac} + \Delta P_{dc} + \Delta P_{trf} + \Delta P_{con}) \cdot C_{ev} \quad (9)$$

$$C_{opr_m} = C_{opr} + C_m \quad (10)$$

(3) 交直流混合微电网的总成本

根据投资成本和运行维护费用可得出交直流混合微电网的运行年限 n 内的总成本 C_t 为

$$C_t = C_{inv} + C_{opr_m} \cdot n \quad (11)$$

2) 3 种新型拓扑结构的经济性分析

假设图 5、图 6 中的交流环网电压和图 7 中的交流馈线电压为 10 kV, 图 7 中的直流馈线电压为 7.5 kV, 交流微电网的母线电压为 380 V、220 V, 直流微电网的母线电压为 750 V、400 V。每个负荷点有 5 个用户。参照当前各电压等级下的交直流电缆、断路器、交流变压器和变流器的市场购买价格以及当前电价, 可按式(4)一式(11)计算得出

$$\begin{aligned} C_{t-s1} &= 695.9 + 318.1n \\ C_{t-s2} &= 333.6 + 17.1n \\ C_{t-s3} &= 405.6 + 116.5n \end{aligned} \quad (12)$$

式中: C_{t-s1} 为多层结构总成本; C_{t-s2} 为单环结构总成本; C_{t-s3} 为交直流互补环形结构总成本。

比较 3 种新型拓扑结构的投资成本和年运行维护费用可知: 单环结构的成本为 3 者中的最小, 主要是由于其拓扑结构相对简单, 变流器、直流断路器等高成本设备较少。多层结构的成本最大, 主要由于其拓扑结构较复杂、电网规模大、电气设备多, 且含有大量高成本的直流设备。而交直流混合互补环型结构的成本位于 3 者中间, 主要是由于不同类型的 DG 和负荷在其内部分布的较为集中, 减少了许多中间变换设备, 节省了投资成本和运行维护费用。

5 结论

交直流混合微电网是解决未来分布式电源和负荷并网的有效途径, 其结构设计关系到微电网的建设成本和运行性能。本文在对交流微网、直流微电网典型结构进行全面对比分析的基础上, 结合交直流微电网设计和建造需满足的分区原则、分层原则、资源利用最大化原则和电能质量保证原则, 提出了 3 种可能的交直流混合微电网结构, 即分层结构、单环结构和交直流互补环型结构。

利用微电网可靠性和经济性的相关分析方法和参考数据, 计算出了 3 种新型拓扑结构的可靠性指标和经济性指标, 并对其进行了对比分析。单环结构的可靠性最高、经济性最优, 适用于 DG 和负荷密度小的地区; 交直流互补环型结构的经济性和可靠性均居中, 适用于不同性质的 DG 和负荷分布较为集中的地区; 而与上述两种结构相比, 多层结构的可靠性和经济性则相对较差, 对 DG 和负荷密度高的地区较为适用。

参考文献

- [1] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [2] 毕大强, 牟晓春, 任先文, 等. 含多微源的微电网控制策略设计[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 687-693.
BI Daqiang, MOU Xiaochun, REN Xianwen, et al. Design on control strategies of microgrid with multiple micro sources[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 687-693.
- [3] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [4] 黄文焘, 邵能灵, 范春菊, 等. 微电网结构特性分析与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 149-155.
HUANG Wentao, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Study on structure characteristics and designing of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 149-155.
- [5] 殷晓刚, 戴冬云, 韩云, 等. 交直流混合微网关键技术研究[J]. 高压电器, 2012, 48(9): 43-46.
YIN Xiaogang, DAI Dongyun, HAN Yun, et al. Discussion on key technologies of AC-DC hybrid microgrid[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9): 43-46.
- [6] DIRESEN J, KATIRAEI F. Design of distributed energy[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008: 30-40.
- [7] Toshifumi ISE. Advantages and circuit configuration of a DC micro-grid[EB/OL]. [2006-06-23]. http://der.lbl.gov/sites/der.lbl.gov/files/Presentation_5_Toshifumi_Ise.pdf.
- [8] 刘振国, 胡亚平, 陈炯聪, 等. 基于双层优化的微电网系统规划设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 124-133.
LIU Zhenguo, HU Yaping, CHEN Jiongcong, et al. A planning and design method for microgrid based on two-stage optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 124-133.
- [9] 曹智平, 周力行, 张艳萍, 等. 基于供电可靠性的微电网规划[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 10-15.
CAO Zhiping, ZHOU Lixing, ZHANG Yanping, et al. Micro-grid planning based on supply reliability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 10-15.
- [10] 朱永强, 贾利虎, 王银顺. 微电网结构设计的基本原则[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(9): 44-49, 63.
ZHU Yongqiang, JIA Lihu, WANG Yinshun. Basic design principles for micro-grid architecture[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(9): 44-49, 63.
- [11] 涂春鸣, 董泰青, 姜飞, 等. 基于分层分区的配电网差异化节能规划方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 148-154.
TU Chunming, DONG Taiqing, JIANG Fei, et al. Research on differentiated energy saving method of partitioned distribution networks based on bi-level planning[J]. Power System Protection and Control, 2015,

- 43(14): 148-154.
- [12] ANAND S, FERNANDES B G. Optimal voltage level for DC microgrids[C] // IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 7-10 November, 2010: 3034-3039.
- [13] 解翔, 袁越, 李振杰. 含微电网的新型配电网供电可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 67-72.
XIE Xiang, YUAN Yue, LI Zhenjie. Reliability analysis of a distribution network with microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 67-72.
- [14] 汪穗峰, 张勇军, 任倩, 等. 配电网可靠性定量分析研究综述[J]. 继电器, 2008, 36(3): 79-83.
WANG Suifeng, ZHANG Yongjun, REN Qian, et al. An overview of quantitative analysis of distribution system reliability[J]. Relay, 2008, 36(3): 79-83.
- [15] 万国成, 任震, 田翔. 配电网可靠性评估的网络等值法模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 48-52.
WAN Guocheng, REN Zhen, TIAN Xiang. Study on model of reliability-network-equivalent of distribution system reliability evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 48-52.
- [16] 周念成, 谢开贵, 周家启, 等. 基于最短路的复杂配电网可靠性评估分块算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(22): 39-44.
ZHOU Niancheng, XIE Kaigui, ZHOU Jiaqi, et al. Reliability evaluation of large scale distribution systems using the shortest path algorithm and section technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(22): 39-44.
- [17] 曾嘉思, 徐习东, 赵宇明. 交直流配电网可靠性对比[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2582-2589.
ZENG Jiasi, XU Xidong, ZHAO Yuming. Reliability comparison of AC and DC distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2582-2589.
- [18] 姜江枫, 丁涛, 寇宇, 等. 基于多范式建模的能源互联网可靠性评估[J]. 陕西电力, 2015, 43(12): 6-9, 26.
JIANG Jiangfeng, DING Tao, KOU Yu, et al. Reliability assessment of energy internet based on multi-paradigm modeling[J]. Shaanxi Electric power, 2015, 43(12): 6-9, 26.
- [19] 田洪迅, 吴文福, 马琳琦, 等. 缺失故障数据元件的可靠性评估方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(1): 22-28, 34.
TIAN Hongxun, WU Wenfu, MA Linqi, et al. Study on reliability evaluation method for components with missing fault data[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(1): 22-28, 34.
- [20] 曾丹, 姚建国, 杨胜春, 等. 柔性直流输电不同电压等级的经济性比较[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 98-102.
ZENG Dan, YAO Jianguo, YANG Shengchun, et al. Economy comparison of VSC-HVDC with different voltage levels[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 98-102.

收稿日期: 2016-01-07; 修回日期: 2016-03-17

作者简介:

蔡冰倩(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网运行与控制技术; E-mail: caibingqiann@163.com

贾利虎(1988-), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源发电与并网技术、微电网运行与控制技术;

朱永强(1975-), 男, 博士, 副教授, 研究方向包括新能源发电与并网技术。

(编辑 周金梅)