基于微增率下垂的交直流混合微电网分散式经济运行控制

李子衿[1], 杨鹏程[2], 郝　良[1], 于　淼[2], 张　淼[1], 韦　巍[2]

(1. 国网北京电力科学研究院, 北京 100075;
2. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310027)

摘要: 在交直流混合微电网中,交流和直流子网之间由双向功率变流器(Bidirectional Power Converter, BPC)连接,实现子网之间的功率互动。本文提出了一种分散式经济运行控制策略,旨在优化微网中各个分布式电源(Distributed Generators, DG)的出力,减小总发电成本(Total Generation Cost, TGC)。针对交流和直流子网中的DG,设计相应的微增率下垂控制,使得同一子网中各DG的微增率相等,根据等微增率准则,此时子网的TGC达到最小。针对BPC,设计互动功率经济优化控制策略,优化交、直子网间的功率交换,从而进一步减小TGC,在不依赖外部通讯的情况下实现交直流混合微电网整体经济优化运行。仿真验证了控制策略的有效性。

关键词: 微增率下垂; 交直流混合微网; 经济运行; 双向功率变流器; 功率协调互动

DOI: 10.12067/ATEEE2012018　　**文章编号:** 1003-3076(2021)04-0035-09　　**中图分类号:** TM727

1　引言

可再生间歇性新能源的不断接入,给传统电力系统的稳定运行和电能质量带来了直接挑战[1]。微电网作为一种新型的供用电模式集成了DG,负荷和储能,通过本地负荷有序消纳新能源,缓解新能源大规模并网带来的调控压力。现有的微电网以交流供电为主,而现代生活中大量负荷如LED、电动车、手机电脑等IT设备均为直流负荷,需要先经过一级交流到直流的变流环节才能接入到交流微电网中;同时DG如光伏和储能呈现直流特性,也需要经过一级直流到交流的变流环节才能接入交流微电网[2]。为了减少交直流间的频繁转换,采用交直流混合微电网的供电形式可直接对交直流负荷供电,同时高效集成不同类型的交直流DG,省略了交直流间频繁的换流环节,提高了综合供电效率[3,4]。

交直流混合微电网由交流子网和直流子网组成,BPC连接着两个子网,其拓扑结构如图1所示。每个子网都具备单独运行的能力,同时可通过BPC进行能量交互。以往的研究主要集中在交直流子网的稳定运行以及交直流间的协调控制等方面[5-10],对其经济运行方面的关注较少。随着交直流混合微电网的规模增大,接入的交直流DG增多,优化各DG的功率分担,降低TGC显得愈发重要。

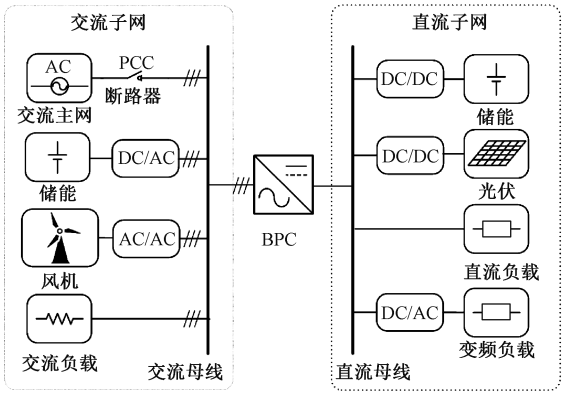


图1　交直流混合微电网拓扑结构

Fig.1　Topology of hybrid AC/DC microgrid

微电网中传统的功率分担优化策略往往依赖集中式控制实现,通过快速通信网络获得全局信息并

收稿日期: 2020-12-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0900500)、国网科技计划项目(SGBJDK00DWJS1700158)

作者简介: 李子衿(1988-), 女, 河北籍, 工程师, 硕士, 研究方向为交直流混合配电网优化运行;
杨鹏程(1993-), 男, 湖北籍, 助理研究员, 博士, 研究方向为新能源发电与消纳, 微电网调控(通讯作者)。

上送至微电网中央控制器(Microgrid Central Controller, MGCC)[11],然后使用混合整数规划[12],遗传算法[13]等优化算法求解各个 DG 的出力指令,最终下发至相应 DG 执行。集中式控制对通讯带宽和可靠性要求极高。随着微电网规模的扩大,通讯网络搭建成本也随之增大,单点故障引发的问题愈发严重,同时也不利于 DG 的即插即用。文献[14,15]采用分层控制优化 DG 间的功率分担,底层采用下垂控制实现动态功率分担,上层控制通过低带宽通信优化各个 DG 的出力,从而缓解了通讯网络压力。文献[16-18]提出改进的下垂控制策略,DG 间不需要通信就能分散式优化 DG 出力,从而自动减小 TGC,但该策略仅适用于交流微电网,无法应用于直流微电网以及更为复杂的交直流混合微电网。文献[19]对直流微电网的经济运行进行了研究,设计了考虑成本的直流下垂控制策略,同时采用二次控制恢复下垂控制导致的直流电压偏差,但仅考虑了并网状态下的情形,无法适用于孤岛下的直流微电网。

不同于单个微电网的优化问题,在交直流混合微电网中,交流子网和直流子网间互动功率的优化需要单独考虑。文献[20]提出了一种多子网的微电网拓扑,交直流子网间通过公共交流母线连接,采用粒子群算法对子网间的功率互动进行优化。文献[21]设计了基于电力电子变压器的多时间尺度交直互动功率优化控制策略,实现了交流子网和直流子网间功率优化调度。文献[22]使用子网实时电价对子网间互动功率进行优化,每个子网将各自的实时电价对系统广播,并接受其他子网的实时电价,从而优化和相邻子网的互动功率。以上的互动功率优化策略均依赖于完备的通讯网络,从而增大了系统的建设成本和复杂程度,通讯延时和通讯失败将严重影响系统的稳定可靠运行。因此,不基于通讯的子网间分散式互动功率优化有待进一步研究。

本文提出一种分散式的交直流混合微电网经济优化运行控制策略,可实现微电网中各 DG 出力的分散式优化,从而最小化 TGC。首先,分别针对交流 DG 和直流 DG,在传统交流频率-有功下垂、直流电压-有功下垂控制中引入包含成本信息的微增率函数,设计了频率-微增率下垂、直流电压-微增率下垂控制,分别减小交流子网和直流子网的 TGC;然后设计了子网间互动功率控制策略,优化交流子网和直流子网间的互动功率,进一步降低 TGC,达到整体经济性最优;最后通过仿真验证了策略的有效性。本文所提的策略不依赖于通讯,仅根据本地采集的电气信息便可实现全局优化,便于 DG 的即插即用,同时具有较好的灵活性和可靠性。

2 交直流混合微电网经济运行问题

经济运行问题旨在优化每个 DG 的出力,减小系统的 TGC。本节首先定义了交直流混合微电网经济运行问题,接着对等微增率准则进行了简要介绍。

2.1 交直流混合微电网的 TGC

DG 的发电成本主要跟有功出力有关,无功成本相对较小,在本文中不考虑该成本。将 DG 分为可调度 DG 和不可调度 DG,可调度 DG 包括微型燃气轮机,柴油机和燃料电池等,其发电成本包含维护成本、燃料成本和排放成本。不可调度 DG 一般为可再生能源 DG,包括光伏、风机,因为其出力受光照、风速的制约,无法实现灵活出力调度,其发电成本一般较低,仅由维护成本和排放成本组成。DG 的成本函数一般可表示为[16,23]:

$$\begin{aligned} C(P) &= C_{\mathrm{m}}(P) + C_{\mathrm{f}}(P) + C_{\xi}(P) \\ &= \alpha P^2 + \beta \mathrm{e}^{\gamma P} + \delta P + \varepsilon \end{aligned} \tag{1}$$

式中,P 为 DG 的有功出力;$C_m(P)$, $C_f(P)$, $C_\xi(P)$ 分别为维护成本、燃料成本和排放成本,可分别用一次函数,二次函数和包含指数项的非线性函数表示[23-25];α, β, γ, δ, ε 分别为化简后的成本函数系数。本文中 DG 的相关数据来自 IEEE6 机 30 节点系统[26],具体数据如表 1 所示。

表 1 DG 的成本函数系数

Tab.1 Cost coefficients of DG

DGi	α	β	γ	δ	ε	$P^{\max}$ (100 kW)	$P^{\min}$ (100 kW)
DG1	10.52	1.0E-4	6.667	14.44	1.61	1.50	0.05
DG2	12.56	5.0E-3	3.333	14.40	1.25	1.50	0.05
DG3	10.65	2.0E-3	2.857	19.44	1.41	1.50	0.05
DG4	4.46	1.0E-5	8.0	17.49	2.43	1.50	0.05

2.1.1　目标函数

交直流混合微电网的 *TGC* 由交直流子网中所有可调度和不可调度 DG 的出力成本构成。

$$TGC = \sum_{i=1}^{M} C_i(P_i) + \sum_{j=1}^{N} C_j(P_j) \tag{2}$$

式中,M、N 分别为交直流子网中的 DG 总数。

2.1.2　约束函数

每台 DG 和 BPC 均有出力约束,同时交流、直流子网需满足功率平衡约束,可表示为:

$$P_i^{\min} < P_i \leqslant P_i^{\max}, P_j^{\min} < P_j \leqslant P_j^{\max} \tag{3}$$

$$P_{\mathrm{BPC}}^{\min} < P_{\mathrm{BPC}} \leqslant P_{\mathrm{BPC}}^{\max} \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^{M} P_i + P_{\mathrm{BPC}} + P_{\mathrm{GC}} = P_{L,\mathrm{ac}} \tag{5}$$

$$\sum_{j=1}^{N} P_j - P_{\mathrm{BPC}} = P_{L,\mathrm{dc}} \tag{6}$$

式中,$P_i^{\max}$、$P_i^{\min}$ 分别为交流 DG_i 出力上下限;$P_j^{\max}$、$P_j^{\min}$ 分别为直流 DG_j 出力上下限;P_{BPC} 为 BPC 的互动功率,定义从直流侧到交流侧为正方向;$P_{\mathrm{BPC}}^{\max}$、$P_{\mathrm{BPC}}^{\min}$ 分别为 BPC 互动功率的上下限;P_{GC} 为微网和交流主网的交互功率;$P_{\mathrm{L,ac}}$ 和 $P_{\mathrm{L,dc}}$ 分别为交流子网和直流子网的负荷功率。

2.2　等微增率准则

微增率指的是 DG 的出力成本对有功出力的微分,即 $\mathrm{d}C(P)/\mathrm{d}P$。为了简化,用 $\lambda(P)$ 表示 DG 的微增率函数。DG 的成本函数一般是凸函数,因此微分后所得的微增率函数是递增函数,表 1 中各 DG 的微增率与其出力的关系如图 2 所示。等微增率准则的定义如下:当 DG 的出力未达到上限时,若它们的微增率相等,则此时 DG 出力的总成本最小[27]。根据等微增率准则,通过控制各个 DG 的微增率使其相等,可以实现交直流混合微网的经济运行,使 TGC 最小。经济最优运行下的各 DG 和交直流子网的微增率关系如式(7)所示:

$$\begin{cases} \text{交流子网}: \lambda_1(P_1) = \cdots = \lambda_i(P_i) = \lambda_{\mathrm{ac}} \\ \text{直流子网}: \lambda_1(P_1) = \cdots = \lambda_j(P_j) = \lambda_{\mathrm{dc}} \\ \lambda_{\mathrm{ac}} = \lambda_{\mathrm{dc}} \end{cases} \tag{7}$$

式中,λ_{ac}、λ_{dc} 分别是交流子网和直流子网在经济运行下的微增率。

若 DG 的出力到达了上限,则相应的微增率会小于或等于其所在子网的微增率。

$$\begin{cases} \lambda_i(P_i) \leqslant \lambda_{\mathrm{ac}}, P_i = P_i^{\max} \\ \lambda_j(P_j) \leqslant \lambda_{\mathrm{dc}}, P_j = P_j^{\max} \end{cases} \tag{8}$$

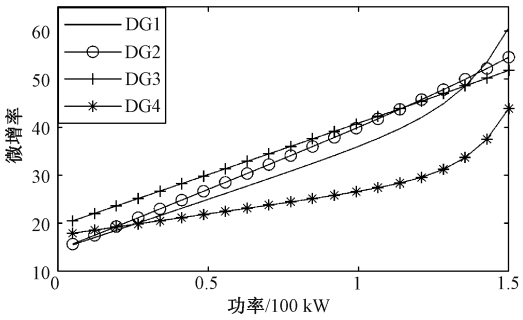


图 2　DG 的微增率

Fig.2　Incremental cost of DGs

3　微增率下垂控制策略

3.1　交流频率-微增率下垂控制

交流微电网中,传统的交流频率-有功下垂控制常用于多个交流 DG 之间的有功功率分担。该下垂控制和下垂系数可表示为:

$$f_i = f^{\max} - m_i(P_i - P_i^{\min}) \tag{9}$$

$$m_i = \frac{f^{\max} - f^{\min}}{P_i^{\max} - P_i^{\min}} \tag{10}$$

式中,f_i 为 DG_i 的输出交流频率;$f^{\max}$、$f^{\min}$ 分别为交流频率额定上下限;m_i 为 DG_i 的频率下垂系数,该系数和 DG_i 的容量成反比。

采用传统下垂控制,当交流微电网达到稳态时,所有 DG 的频率相等,即 f_i 相等。根据式(9)和式(10)可知,稳态下各 DG 的有功出力将与各 DG 的容量成正比,从而实现按容量的分散式功率分担。由于传统交流下垂控制仅考虑了 DG 的容量,而没有考虑 DG 的发电成本,因此传统下垂控制下的功率分担并不是经济最优的。

为了实现经济分担,在不依赖于全局通讯网络的前提下,可利用下垂控制的分散式功率分担特性,结合 DG 的发电成本信息,改进传统交流下垂控制。根据等微增率准则,当各 DG 的微增率相等时,功率分担达到经济最优。本节针对交流子网中的 DG,引入微增率函数,设计交流频率-微增率下垂控制策略,旨在使得各个 DG 的微增率相等,该控制可表示为:

$$f_i = f^{\max} - m[\lambda_i(P_i) - \lambda_{\mathrm{ac}}^{\min}] \tag{11}$$

式中,m 为交流微增率下垂系数。为了使该控制下每个 DG 的输出频率处于频率允许范围区间,设计下垂系数为频率允许范围和微增率变化范围之比,由下式给出:

$$m = \frac{f^{\max} - f^{\min}}{\lambda_{\mathrm{ac}}^{\max} - \lambda_{\mathrm{ac}}^{\min}} \tag{12}$$

式中，λ_{ac}^{max}、λ_{ac}^{min} 分别为交流子网内所有 DG 微增率的上限和下限：

$$\begin{cases}\lambda_{ac}^{max}=\max[\lambda_1(P_1^{max}),\dots,\lambda_M(P_M^{max})]\\ \lambda_{ac}^{min}=\min[\lambda_1(P_1^{min}),\dots,\lambda_M(P_M^{min})]\end{cases}\tag{13}$$

交流频率-微增率下垂控制下的输出频率和 DG 出力关系如图 3 所示，其纵坐标为频率。由图 3 可知，微增率下垂控制下的功率分担是非线性的，且与微增率直接相关。对于图 2 中微增率较低的 DG4，其发电的边际成本也较低，将优先分担功率，随着负荷增加，DG4 将最快到达出力上限，并将保持最大功率输出。随着负荷的继续增加，交流频率将持续下降，DG3、DG2 将依次达到其出力上限，当微增率最大的 DG1 也达到出力上限时，系统总出力也达到出力上限，交流子网频率降至允许范围的下限。

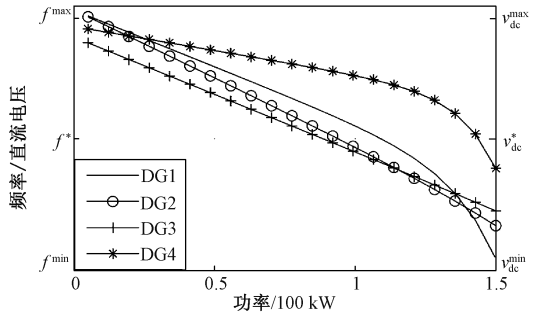


图 3 DG 的输出频率/直流电压-有功出力特性

Fig.3 Frequency/DC voltage-active power characters

式(12)中的交流微增率下垂系数 m 和式(13)中的交流子网微增率下限 λ_{ac}^{min} 对所有交流 DG 保持一致，在稳态下，每个 DG 的输出频率相等，根据控制表达式(11)，稳态下每个 DG 的微增率 $\lambda_i(P_i)$ 将会保持相等。根据等微增率准则，此时各个 DG 将实现功率经济分担，即交流子网实现经济运行，此时交流子网 TGC 达到最小。

为了保障无功的有序分担，仍采用传统的电压幅值-无功下垂控制[14]，负荷无功将根据各个 DG 的容量按比例分担。设计交流 DG 的交流频率-微增率下垂控制拓扑如图 4 所示，采用电压电流双环控制结构跟踪参考电压，参考电压的频率和电压分别由提出的交流频率-微增率下垂控制和传统电压幅值-无功下垂控制产生。由于微增率计算环节的引入，使得微增率下垂控制呈现非线性特征，并将根据微增率自动优化有功分担，整套控制器仅需采集本地电压、电流电气量，不需建立通讯获取外部信息便可实现交流子网的分散式经济运行。

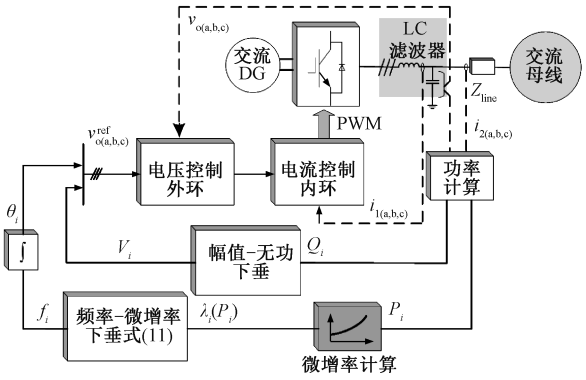


图 4 交流子网内 DG 控制拓扑

Fig.4 Control topology of DG in ac subgrid

3.2 直流电压-微增率下垂控制

对于直流微电网，传统直流电压-功率下垂控制被用于多个直流 DG 之间功率分担。该下垂控制和下垂系数可表示为：

$$v_{dc,j}=v_{dc}^{max}-w_j(P_j-P_j^{min})\tag{14}$$

$$w_j=\frac{v_{dc}^{max}-v_{dc}^{min}}{P_j^{max}-P_j^{min}}\tag{15}$$

式中，$v_{dc,j}$ 为 DG_j 的输出直流电压；v_{dc}^{max}、v_{dc}^{min} 分别为直流电压的上下限；w_j 为 DG_j 的下垂系数。

在直流微电网中，线路阻抗会导致电压偏差，进而影响功率分担。和下垂控制引入的压降比起来，线路阻抗导致的压降很小可以忽略[28]。因此，在稳态下，所有 DG 的直流电压可视为相等，即 $v_{dc,j}$ 相等。根据式(14)和式(15)可知，稳态下各 DG 的有功功率分担将与各 DG 的容量成正比，从而实现按容量的分散式功率分担。为了实现经济分担，根据等微增率准则，当各 DG 的微增率相等时，功率分担达到经济最优。考虑发电成本，在直流下垂控制中引入 DG 的微增率函数，设计直流电压-微增率下垂控制策略，实现直流子网中负荷功率的经济分担，该控制可表示为：

$$v_{dc,j}=v_{dc}^{max}-w[\lambda_j(P_j)-\lambda_{dc}^{min}]\tag{16}$$

式中，w 为直流微增率下垂系数。为了使该控制下每个 DG 的输出直流电压处于直流电压允许范围区间，设计下垂系数为直流电压允许范围和微增率变化范围之比，由式(17)给出：

$$w=\frac{v^{max}-v^{min}}{\lambda_{dc}^{max}-\lambda_{dc}^{min}}\tag{17}$$

式中，λ_{dc}^{max}、λ_{dc}^{min} 为直流子网中所有 DG 微增率的上限和下限：

$$\begin{cases}\lambda_{dc}^{max}=\max[\lambda_1(P_1^{max}),\dots,\lambda_N(P_N^{max})]\\ \lambda_{dc}^{min}=\min[\lambda_1(P_1^{min}),\dots,\lambda_N(P_N^{min})]\end{cases}\tag{18}$$

由式(17)、式(18)可知,对直流子网中的每个 DG, w 和 λ_{dc}^{min} 均保持一致,在稳态下,每个 DG 的输出直流电压也相等,根据式(16)可知,每个 DG 的微增率 $\lambda_j(P_j)$ 将会保持相等。根据等微增率准则,此时直流子网中各个 DG 将实现分散式功率经济分担,即直流子网实现经济运行,此时直流子网的 TGC 将达到最小。设计直流 DG 的直流电压-微增率下垂控制拓扑如图 5 所示。将微增率函数代入式(16),可得到 DG 出力和输出直流电压的关系如图 3 所示,其纵坐标表示直流电压。

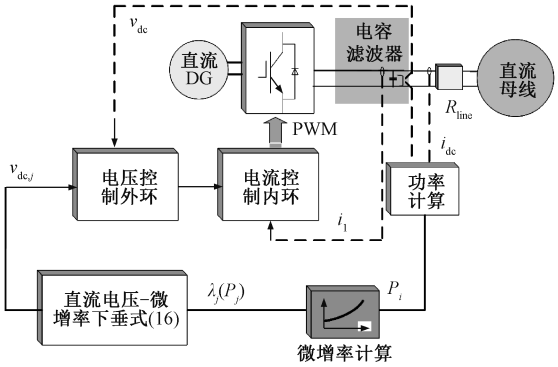


图 5　直流子网内 DG 控制拓扑

Fig.5　Control topology of DG in dc subgrid

4　互动功率经济优化控制策略

采用第 3 节提出的频率-微增率下垂和直流电压-微增率下垂控制,交流子网和直流子网内所有 DG 的微增率将分别保持相等,即实现式(7)的前两项。要达到交直流混合微电网整体的经济最优,还需满足式(7)中第三项,即使得交流子网和直流子网的微增率也相等。BPC 可以管理交流、直流子网间的功率互动,根据式(5)和式(6)的功率平衡约束,改变互动功率,可以间接调节交流、直流子网中 DG 的出力,进而改变交直流子网的微增率。

稳态下,交流子网中 DG 的微增率彼此相等,等于交流子网的微增率,BPC 采集交流母线上的电压信息可得到子网的频率,代入式(11)可得到交流子网的微增率:

$$\lambda_{ac}=\lambda_{ac}^{*}+\frac{1}{m}(f^{*}-f)\tag{19}$$

同样 BPC 采集直流母线电压信号代入式(16)可得到直流子网的微增率:

$$\lambda_{dc}=\lambda_{dc}^{*}+\frac{1}{w}(v_{dc}^{*}-v_{dc})\tag{20}$$

针对 BPC,设计 PI 控制器可以无静差地实现交、直流子网微增率相等。将交流子网和直流子网的微增率之差作为 PI 控制器的输入,输出设为 BPC 的互动功率:

$$P_{BPC}=(k_P+k_I/s)(\lambda_{ac}-\lambda_{dc})\tag{21}$$

式中,k_P、k_I 分别为 PI 控制器的比例和积分参数。

互动功率优化控制拓扑如图 6 所示,该控制可调控交直流子网间的互动功率,进而调节交直流子网的微增率,使得两者相等,从而进一步降低交直流混合微电网的 TGC,实现交直流两侧整体的优化运行。BPC 的控制器只需要采集本地的频率和直流电压信号,不需要额外增加通讯,具备较好的可靠性和灵活性。

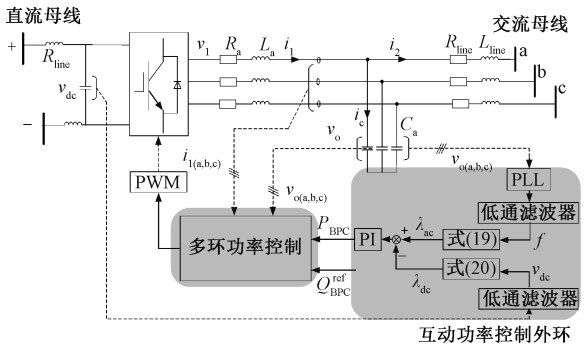


图 6　BPC 互动功率经济优化控制拓扑

Fig.6　Economic interaction power control of BPC

5　仿真验证

为了验证控制策略的有效性,在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建如图 7 所示的交直流混合微电网仿真模型,其中 DG1,DG2 位于交流子网,DG3,DG4 位于直流子网。交直流混合微电网关键参数如表 2 所示。

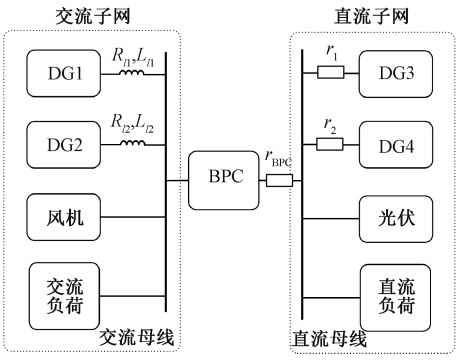


图 7　交直流混合微电网仿真结构

Fig.7　Hybrid AC/DC microgrid in Simulink

表 2 交直流混合微电网关键参数

Tab.2 Parameters of hybrid ac/dc microgrid

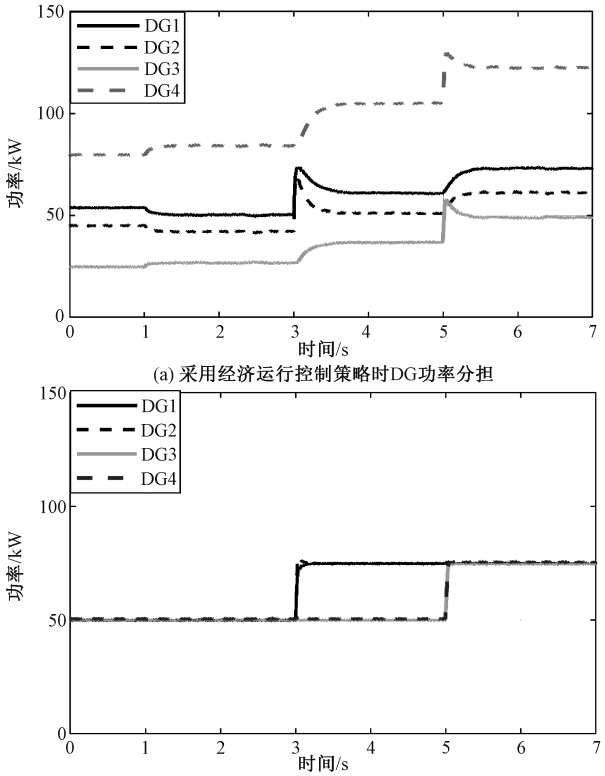
名称	额定值
交流母线	380 V/50 Hz ± 0.5 Hz
直流母线电压/V	600±30
交流容量	300 kW/100 kVar
直流容量/kW	300
风机容量	100 kW/50 kVar
光伏容量/kW	80
DG1/2/3/4 容量/kW	150/150/150/150
DG1 交流线阻抗	2 mΩ/1.5 mH
DG2 交流线阻抗	1 mΩ/1.2 mH
DG3 直流线阻抗/mΩ	6
DG4 直流线阻抗/mΩ	3
BPC 直流线阻抗/mΩ	4

仿真结果如图 8～图 12 所示。图 8(a),图 8(b)分别为采用经济运行控制策略时和采用传统下垂控制时各个 DG 的出力;图 9(a),图 9(b)分别为采用经济运行控制策略和采用传统下垂控制时交流子网的频率和直流子网的电压;图 10(a),图 10(b)分别为经济运行控制策略和采用传统下垂控制策略时交流各个 DG 的微增率;图 11 为采用经济运行控制策略时 BPC 的互动功率;图 12 为采用不同控制策略时的 TGC。第 3 s 时刻,交流侧负载增大 50 kW,第 5 s 时刻,直流负载增大 50 kW。当采用经济运行控制策略时,BPC 的互动功率经济优化控制策略在第 1 s 投入。

对比图 8(a)和图 8(b)可知,当采用经济运行控制策略时,DG 之间功率分担将不再按照 DG 容量进行分担,而将按照微增率进行分担。不同负荷条件下的分担情况如图 3 所示。而采用传统下垂控制时,功率的分担仅和 DG 的容量有关。四个 DG 的容量均为 150 kW,因此交流子网中 DG1 和 DG2 的分担比保持为 1 比 1,直流子网中 DG3 和 DG4 的分担比也保持为 1 比 1。

比较图 9(a)图 9(b)可知,当采用经济运行控制策略时,一旦某一侧子网的负荷功率波动,另一侧也会响应功率波动,频率和直流电压会同步响应,共同分担功率波动。而采用传统下垂控制的两个子网间没有这样的协同机制,交流和直流子网间无法共同分担功率波动,频率和直流电压也不会同步响应。

比较图 10(a)图 10(b)可以看出,当采用经济运行控制策略时,BPC 的互动功率优化控制策略在第 1 s 投入运行,交流子网和直流子网内 DG 的微增率趋于一致,第 3 s 和第 5 s 的负荷突变暂态结束

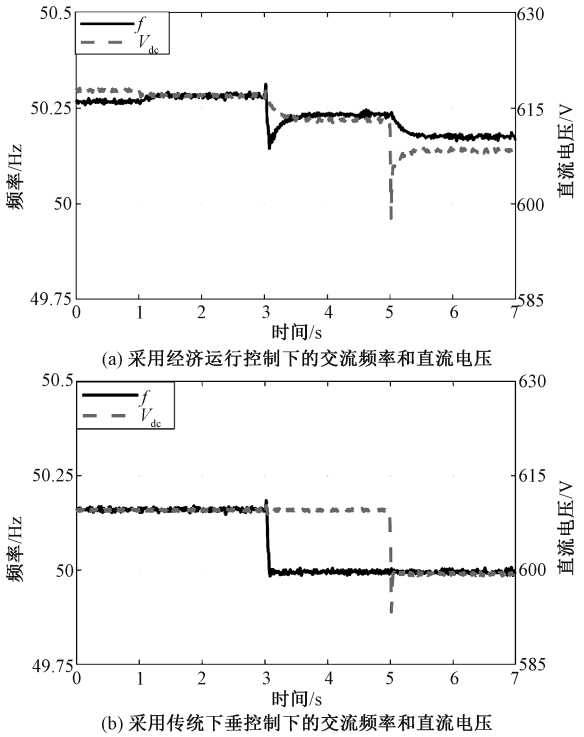


(a) 采用经济运行控制策略时DG功率分担

(b) 采用传统下垂控制策略时DG功率分担

图 8 不同控制下 DG 功率分担情况

Fig.8 Power sharing of DGs with different controls

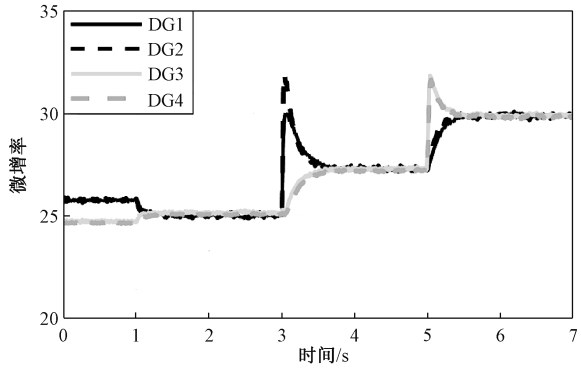


(a) 采用经济运行控制下的交流频率和直流电压

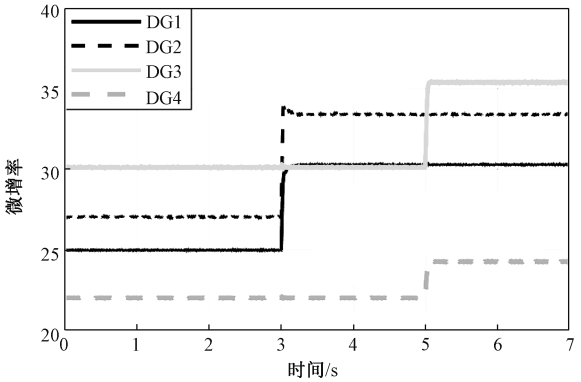
(b) 采用传统下垂控制下的交流频率和直流电压

Fig.9 不同控制下的交流频率和直流电压

Fig.9 Frequency and DC voltage with different controls



(a) 采用经济运行控制下各DG的微增率



(b) 采用传统下垂控制策略下各DG的微增率

Fig.10　不同控制下的交流频率和直流电压

Fig.10　DGs' incremental cost with different controls

稳态下 4 个 DG 的微增率保持相等,说明提出的控制策略实现了预期的目的。而传统下垂控制下,各个 DG 的微增率不会趋于相等。

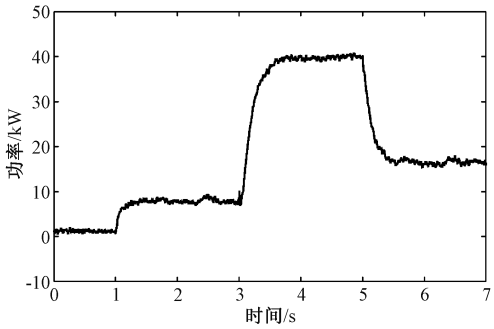


图 11　互动功率经济优化控制下 BPC 功率

Fig.11　Power of BPC with proposed economic operation control

图 11 中,BPC 的功率流向交流侧为正方向,交流子网负荷在第 3 s 增大,BPC 功率增大以分担交流负荷,直流子网负荷在第 5 s 增大,BPC 功率减小,以分担直流负荷,说明 BPC 的互动功率优化策略能实现交直流子网间的功率自适应调整,从而自动分担功率波动一侧的负荷。

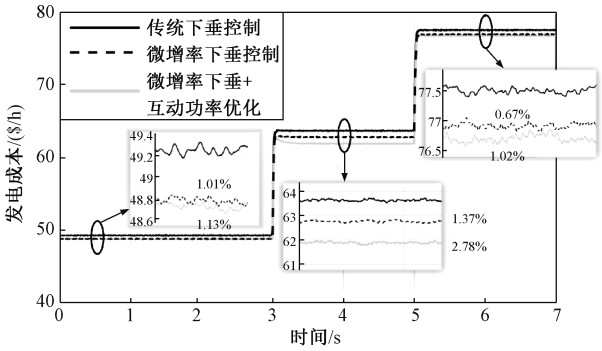


图 12　不同控制策略下交直流混合微电网的 TGC

Fig.12　TGC of hybrid AC/DC micrigrid with different control strategies

图 12 对比了传统下垂控制、仅微增率下垂控制、微增率下垂和 BPC 互动功率优化控制三种情况下的 TGC。由图 12 可知,当仅采用微增率下垂控制时,相比传统下垂控制 TGC,三种负荷情况下,微增率下垂控制的 TGC 分别减小了 1.01%,1.37%,0.76%。此时交直流子网内部的 DG 的微增率已分别相等,子网内部已达到最优,但交直流子网间的增率不相等,交直流混合微电网整体经济性还有待优化,对应于图 10 中第 1 s 内的情况,四个 DG 的微增率两两相等,但不同子网内的 DG 的微增率不相等。在此基础上加入 BPC 互动功率优化控制后,在三种负荷条件下,相比于传统下垂控制,所提出的经济运行控制策略下的 TGC 分别减小了 1.13%,2.78%,1.02%。BPC 互动功率控制优化了交直流子网间的互动功率,使得交直流子网的微增率相等,进而促使交直流混合微电网中各个 DG 微增率均保持相等,根据等微增率准则,此时的 TGC 达到最小,所提出的经济运行控制实现了交直流混合微电网经济最优运行。

6　结论

本文针对交直流混合微电网,提出了一种分散式的经济运行控制策略。将微增率引入到传统下垂控制,分别在交流子网和直流子网中,设计了频率-微增率和直流电压-微增率下垂控制,实现了子网级的经济运行。然后在 BPC 上设计子网间互动功率优化控制策略,从而实现了交直流混合微电网整体的优化运行,并使得 TGC 达到最小。不同于传统的经济优化控制,本文提出的控制策略不需要建立通讯,降低了系统复杂程度,提高了系统的可靠性,同时便于实现即插即用。下一步的研究将考虑并网模

式下,交直流混合微电网向大电网购/售电的可能性,统筹优化购/售电量、DG 出力以及子网间互动功率,设计相应的分散式优化运行方案。

参考文献(References):

[1] Carrasco J M, Franquelo L G, Bialasiewicz J T, et at. Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53 (4): 1002-1016.

[2] 李霞林, 郭力, 王成山, 等 (Li Xialin, Guo Li, Wang Chengshan, et al.). 直流微电网关键技术研究综述 (Key technology of DC microgrids: An overview) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings, of the CSEE), 2016, 36 (1): 2-17.

[3] Nejabatkhah F, Li Y W. Overview of power management strategies of hybrid AC/DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronic, 2015, 30 (12): 7072-7089.

[4] Guerrero J M, Loh P C, Lee T L, et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids-part II: power quality, energy storage, and AC/DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (4): 1263-1270.

[5] 朱永强, 贾利虎, 蔡冰倩, 等 (Zhu Yongqiang, Jia Lihu, Cai Bingqian, et al.). 交直流混合微电网拓扑与基本控制策略综述 (A review on AC/DC hybrid microgrid key technology containing distributed new energy) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2016, 42 (9): 2756-2767.

[6] 周稳, 戴瑜兴, 毕大强, 等 (Zhou Wen, Dai Yuxing, Bi Daqiang, et al.). 交直流混合微电网协同控制策略 (Coordinative control strategy for hybrid AC-DC microgrid) [J]. 电力自动化设备 (Power Automation Equipment), 2015, 35 (10): 51-57.

[7] 蔡宏达, 夏杨红, 杨鹏程, 等 (Cai Hongda, Xia Yanghong, Yang Pengcheng, et al.). 交直流混合微电网多模式协调下垂控制 (Multi-mode coordination droop control for hybrid AC/DC microgrids) [J]. 供用电 (Distribution & Utilization), 2018, 35 (1): 2-7.

[8] 陈安伟 (Chen Anwei). 多母线结构交直流混合微电网协调控制与模式切换策略 (Coordination control and mode switching strategy for hybrid AC/DC microgrid with multi-bus structure) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2018, 42 (17): 175-186.

[9] 施静容, 李勇, 王姿雅, 等 (Shi Jingrong, Li Yong, Wang Ziya, et al.). 交直流混合微电网互联变换器功率流动的柔性控制策略 (Flexible power flow control strategy for interlinking converter in AC/DC hybrid microgrid) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2018, (11): 1-6.

[10] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等 (Ding Ming, Tian Longgang, Pan Hao, et al.). 交直流混合智能型微电网 (Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid) [J]. 电力工程技术 (Electric Power Engineering Technology), 2018, 37 (4): 3.

[11] Tsikalakis G, Hatziargyriou N D. Centralized control for optimizing microgrids operation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 33 (1): 241-248.

[12] Khodayar M E, Barati M, Shahidehpour M. Integration of high reliability distribution system in microgrid operation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3 (4): 1997-2006.

[13] Sortomme E, El-Sharkawi M A. Optimal power flow for a system of microgrids with controllable loads and battery storage [A]. 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition [C]. 2009. 1-5.

[14] Guerrero J M, Vasquez J C, Matas J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids: A general approach toward standardization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (2): 576-588.

[15] Pogaku N, Prodanovic M, Green T C, et al. Modeling analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22 (2): 613-625.

[16] Nutkani U, Loh P, Wang P, et al. Linear de-centralized power sharing schemes for economic operation of AC microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 63 (1): 225-234.

[17] 朱旋, 陈得宝, 方振国, 等 (Zhu Xuan, Chen Debao, Fang Zhenguo, et al.). 平均成本下垂控制策略在分布式发电中的应用 (Mean cost-based droop scheme in the appllication of distributed generators) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2015, 43 (10): 14-20.

[18] Chen F, Chen M, Li Q, et al. Cost-based droop schemes for economic dispatch in islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8 (1): 63-74.

[19] Nutkani U, Peng W, Loh P C, et al. Autonomous economic operation of grid connected dc microgrid [A]. 2014 IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems [C]. Galway, Ireland, 2014. 1-5.

[20] Nikmehr N, Ravadanegh S N. Optimal power dispatch of multi-microgrids at future smart distribution grids [J].

IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6 (4): 1648-1657.

[21] 蒲天骄, 李烨, 陈乃仕, 等 (Pu Tianjiao, Li Ye, Chen Naishi, et al.). 基于电力电子变压器的交直流混合系统优化运行控制关键技术及研究框架 (Key technology and research framework for optimal operation control of hybrid AC/DC system based on power electronic transformer) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2018, 42 (9): 2752-2759.

[22] Fathi M, Bevrani H. Statistical cooperative power dispatching in interconnected microgrids [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4 (3): 586-593.

[23] Nutkani U, Loh P, Wang P, et al. Cost-prioritized droop schemes for autonomous AC microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (2): 1109-1119.

[24] Talaq J H, El-Hawary F, El-Hawary M E. A summary of environmental/economic dispatch algorithms [J]. IEEE Transactions on Power System, 1994, 9 (3): 1508-1516.

[25] Farag A, Al-Baiyat S, Cheng T C. Economic load dispatch multiobjective optimization procedures using linear programming techniques [J]. IEEE Transactions on Power System, 1995, 10 (2): 731-738.

[26] Das D B, Patvardhan C. New multi-objective stochastic search technique for economic load dispatch [J]. IEE Proceeding Generation Transmission and Distribution, 1998, 145 (6): 747-752.

[27] Wood A J, Wollenberg B F. Power generation operation and control [M]. New York: Wiley- Interscience, 1996.

[28] Lu X, Sun K, Guerrero J, et al. State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61 (6): 2804-2815.

Decentralized economic operation in hybrid AC/DC microgrid based on incremental cost droop control

LI Zi-jin[1], YANG Peng-cheng[2], HAO Liang[1], YU Miao[2], ZHANG Miao[1], WEI Wei[2]

(1. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China;
2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In the hybrid ac/dc microgrid, the ac and dc subgrids are connected by bidirectional power converter (BPC) that plays an important role in the power interaction between the ac and dc subgrids. This paper describes a decentralized economic operation control strategy for the hybrid ac/dc microgrid, which aims to realize economic power dispatch for all distributed generators (DGs) in ac and dc subgrids, and hence decrease the total generation cost (TGC). Concretely, (1) for the DGs in ac and dc subgrid, the incremental cost droop controls are proposed respectively, which can make DGs' incremental cost equal in the same subgrid, and hence decrease the subgrids' generation costs autonomously in the light of the equal incremental cost principle; (2) for the BPC, the economic power interaction strategy is proposed to manage the power exchange between the two subgrids and further decrease the TGC. The simulation confirms the effectiveness of the proposed control method.

Key words: incremental cost droop; hybrid AC/DC microgrid; economic operation; bidirectional power converter; power interaction