

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.04.004

## 交直流混合配电网分布式无功电压互动控制策略

耿少博<sup>1</sup>, 顾乔根<sup>2,3</sup>, 常风然<sup>1</sup>, 孙利强<sup>1</sup>, 王强<sup>1</sup>, 张海宁<sup>2,3</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司, 河北 石家庄 050021;

2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;

3. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:**交直流混合配电网的无功电压控制是保证其高效可靠运行的关键。为此,提出一种基于有限时间控制的分布式无功电压互动控制策略,在无集中控制器的架构下实现交流子网与直流子网间的无功电压互动支撑。该方法构建了分布式去中心化协同控制架构,利用有限时间控制实现多逆变器间的分布式一致性协同,同时保障无功功率增量的精确均分,避免多个下垂控制逆变器间的无功环流问题,进一步提高电压质量。相对于传统的一致性策略,所提出的策略收敛速度更快,且可适应系统各种扰动。为了验证该控制策略的控制效果,在PSCAD/EMTDC中建立了交直流混合配电网仿真模型,在多种工况下验证了系统分布式互动支撑及无功均分策略的有效性和适应性。

**关键词:**交直流混合配电网;无功电压控制;互动支撑;下垂控制

中图分类号:TM732

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)04-0026-08

### 0 引言

分布式电源是实现可再生能源利用的主要方式,通过将分布式电源接入配电网,从而对各种分布式电源进行管理和控制,使可再生能源充分利用到配电网中<sup>[1-2]</sup>。在配电网中,交直流混合配电网兼顾交流配电网和直流配电网的优点,具有很大的发展潜力<sup>[3]</sup>。混合配电网中交流子网和直流子网的互动运行能够极大地避免不必要的电能转换,从而降低系统损耗<sup>[4-7]</sup>。相比于一般的交流配电网,交直流混合配电网能适应各种分布式电源和负荷的接入<sup>[8-9]</sup>。但高度随机的分布式能源出力、灵活多样的运行模式又给交直流混合配电网的运行控制提出了诸多挑战<sup>[10-13]</sup>。

互联运行方式下,交直流配电网中双向换流器和分布式电源需采取有效的控制策略对系统的交流子网与直流子网进行互动支撑和负荷的合理分配。下垂控制是实现负荷均流的有效控制方式<sup>[14]</sup>,但在通过下垂控制的分布式电源在各自阻抗不一致的情况下,很难做到对系统各分布式电源的无功功率进行合理分配,从而导致一些分布式电源过载,系统各处无功电压不平衡,进而影响系统的稳定运行<sup>[15-18]</sup>。

为了解决交直流配电网无功电压控制的问题,文

献[19—20]提出了分层控制策略,实现系统的二次电压恢复。文献[21]提出了一种功率-电压协调控制方法,抑制分布式电源的波动使节点电压保持平稳。针对交直流之间功率互动控制问题,文献[22—23]提出一种双向变流器的新型控制策略,提升系统功率传输能力。文献[24—25]利用分布式的控制架构对系统进行优化,采用基于多代理一致性的方法,实现对系统的整体控制。

文中基于多代理系统的控制方法提出了一种有限时间控制的无功电压互动控制方法。该方法利用局部信息交互、在无集中控制器的情况下有效实现整体系统的协同,并提高系统的收敛速度。

### 1 交直流混合配电网结构

典型的交直流混合配电网模型如图1所示,其中双向变流器用来实现交流配电网和直流配电网的功率转换,作为交流与直流的互动控制器件。双向变流器通过改变自身运行方式,使自身整流运行或是逆变运行,使功率过剩的子网向功率缺失的子网传输功率,从而达到系统平衡状态。

一般情况下,系统由交流子网与大电网连接。联网运行情况下,配电网的频率、电压均由大电网来保持稳定,维持配电网的稳定运行。当配电网发生故障或扰动时,系统并网点开关断开,双向变流器负责协调控制2个子网的功率交换与平衡。

某个子网由于系统扰动而产生功率差额,为了避免系统进行不必要的整流或逆变环节,当功率差

收稿日期:2019-02-25;修回日期:2019-03-27

基金项目:国家重点研发计划资助项目(SG NR0000GZJS18-08118)

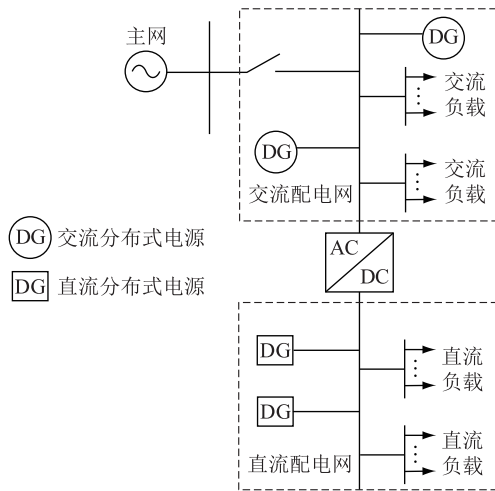


图1 交直流混合配电网模型

Fig.1 Model of AC/DC hybrid distribution network

额在一定范围时,双向变流器不进行逆变或是整流控制,而是由各分布式电源增加有功无功出力以满足系统要求。

当功率差额较大时,双向变流器开启。当交流配电网出现功率差额时,双向变流器运行在逆变状态,直流配电网通过双向变流器将功率传输到交流配电网。当直流配电网产生功率差额时,双向变流器运行在整流状态,交流配电网通过双向变流器将功率传输到直流配电网。

因此,可以采集交流子网的功率、电压实际值和直流子网的功率、电压实际值作为双向变流器运行状态的依据。文中针对交直流混合配电网的分布式电源和双向变流器的控制进行研究。

## 2 分布式电源下垂控制及无功控制基本原理

作为交直流配电网分布式电源的一次控制,下垂控制是通过分布式电源输出的有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  分别与频率  $f$  和电压  $U$  拥有比例关系的原理实现的控制。

### 2.1 交流分布式电源的下垂控制

(1) 内环控制器。电流内环控制方法见式(1)。

$$\begin{cases} P_{md} = \left( k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s} \right) (i_{dref} - i_d) - \omega L i_q + u_d \\ P_{mq} = \left( k_{p2} + \frac{k_{i2}}{s} \right) (i_{qref} - i_q) + \omega L i_d + u_q \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_{md}, P_{mq}$  分别为逆变器载波交直流轴分量;  $i_{dref}, i_{qref}$  分别为电流交直流的参考值;  $i_d, i_q$  分别为电流测量值的交直流轴分量;  $u_d, u_q$  分别为电压测量值的

交直流轴分量;  $k_{p1}, k_{p2}, k_{i1}, k_{i2}$  为 PI 控制器参数。内环控制如图 2 所示。

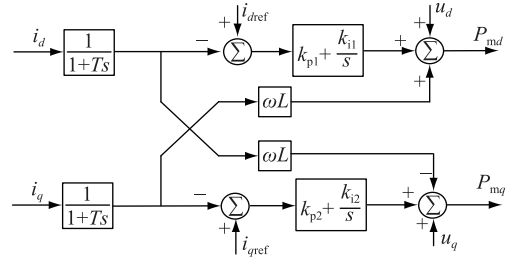


图2 下垂控制内环控制

Fig.2 Droop control inner loop control

(2) 外环控制器。下垂控制的外环控制器控制方法见式(2)和式(3)。

$$\begin{cases} P_{ref} = P_0 + (f_0 - f) K_f \\ Q_{ref} = Q_0 + (U_0 - U) K_U \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} i_{dref} = \left( k_{p3} + \frac{k_{i3}}{s} \right) (P_{ref} - P_{grid}) \\ i_{qref} = \left( k_{p4} + \frac{k_{i4}}{s} \right) (Q_{ref} - Q_{grid}) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $P_{ref}, Q_{ref}$  分别为有功和无功功率参考值;  $P_{grid}, Q_{grid}$  分别为有功和无功功率的实测值;  $K_f, K_U$  分别为频率增益与电压增益;  $k_{p3}, k_{p4}, k_{i3}, k_{i4}$  为 PI 控制器参数。外环控制如图 3 所示。

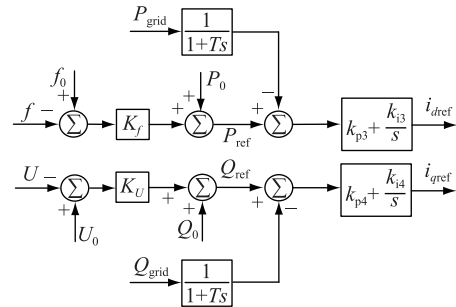


图3 下垂控制外环控制

Fig.3 Droop control outer loop control

### 2.2 直流分布式电源的下垂控制

直流配电网的下垂控制采用电压与电流的下垂关系,或是电压与功率的下垂关系来进行控制,维持直流配电网的稳定。为了使双向变换器能够对交流功率与直流功率进行协同控制,文中直流电源的控制采用电压与功率的下垂关系进行控制,电压与功率的下垂关系式为:

$$i_{ref} = \left( k_p + \frac{k_i}{s} \right) [U_{ref} + d(P_{ref} - P) - U] \quad (4)$$

$$P_{md} = \left( k_p + \frac{k_i}{s} \right) (i_{ref} - i)$$

式中:  $U_{\text{ref}}$  为直流电源的预设值;  $P$  为直流电源功率的实际输出值;  $d$  为下垂控制系数。将直流配电网中的直流电源的下垂控制系数设置为:

$$d_1 P_{\text{ref},1} = d_2 P_{\text{ref},2} = \dots = d_n P_{\text{ref},n} \quad (5)$$

式中:  $i=1, 2, \dots, m$ ;  $P_{\text{ref},n}$  为第  $n$  个直流电源的功率预设值。这样能使直流电源按其自身的额定功率大小在整个直流系统中占的比例输出相同比例的功率, 达到平均分配的目的。直流下垂控制见图 4。

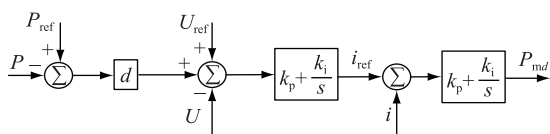


图 4 直流下垂控制

Fig.4 DC droop control

### 3 提升交流子网与直流子网互动的分布式无功电压优化运行策略

为了提升交流子网与直流子网的互动支撑能力以及配电网受到扰动时的电压质量, 提出基于多代理系统的交直流配电网互动运行分布式控制策略, 作为配电网的二次控制。

#### 3.1 改进的下垂控制

通过对下垂控制中设置的电压最小值进行控制, 使交流电源的无功输出对系统负荷变化作出相应的响应, 改变分布式电源输出, 恢复系统电压。

由下垂控制得:

$$\Delta Q = \Delta u d \quad (6)$$

$$d = \frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{ref}}}{u_{\text{ref}} - u_{\text{min}}} \quad (7)$$

式中:  $\Delta Q$  为系统无功变化;  $\Delta u$  为系统电压变化量;  $Q_{\text{max}}$  为无功最大值;  $u_{\text{ref}}$  为电压参考值;  $u_{\text{min}}$  为电压最小值。可得出响应系统无功变化的  $u_{\text{min}}$  为:

$$u_{\text{min}} = u_{\text{ref}} - \frac{\Delta u (Q_{\text{max}} - Q_{\text{ref}})}{\Delta Q} \quad (8)$$

其控制框图如图 5 所示。

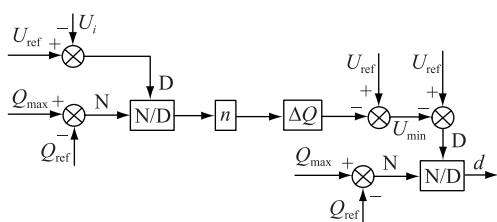


图 5 下垂控制电压最小值控制

Fig.5 Drop control voltage minimum control

#### 3.2 交直流混合配电网互动支撑机制

交流子网与直流子网的功率互动支撑主要通

过双向变流器控制实现。交流子网和直流子网各自采用的下垂控制不一样, 因此需要在双向变流器中将交直流的下垂特性同一化, 进而才能对交流子网和直流子网进行协同控制。

在交流子网中, 无功采用无功功率与电压的下垂关系进行控制, 而在直流子网中, 则是采用电压和功率的下垂关系进行控制, 它们均可以由各自的电压来反馈功率, 这样就可以将交直流电压进行同一化处理, 让其拥有一样的数值范围。式(9)是交流电压的同一化方法, 式(10)则是直流电压的同一化方法。

$$U_{\text{ac}}^{\text{pu}} = \begin{cases} \frac{U_{\text{ac}} - U_{\text{acN}}}{U_{\text{acmax}} - U_{\text{acN}}} & U \geq U_{\text{acN}} \\ \frac{U_{\text{acN}} - U}{U_{\text{acmin}} - U_{\text{acN}}} & U < U_{\text{acN}} \end{cases} \quad (9)$$

$$U_{\text{dc}}^{\text{pu}} = \begin{cases} \frac{U_{\text{dc}} - U_{\text{dcN}}}{U_{\text{dcmax}} - U_{\text{dcN}}} & U_{\text{dc}} \geq U_{\text{dcN}} \\ \frac{U_{\text{dcN}} - U_{\text{dc}}}{U_{\text{dcmin}} - U_{\text{dcN}}} & U_{\text{dc}} < U_{\text{dcN}} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $U_{\text{acN}}$  为交流子网母线电压预设值;  $U_{\text{acmax}}$  为交流母线电压的最大值;  $U_{\text{acmin}}$  为交流母线电压的最小值;  $U_{\text{dcN}}$  为直流子网母线电压预设值;  $U_{\text{dcmax}}$  为直流母线电压的最大值;  $U_{\text{dcmin}}$  为直流母线电压的最小值;  $U_{\text{ac}}^{\text{pu}}$ ,  $U_{\text{dc}}^{\text{pu}}$  分别为同一化处理后的交流电压值和直流电压值。

交流子网和直流子网母线电压化为同一坐标系上的变量, 当交流子网和直流子网的母线电压处于相同的点上, 就达到了交流子网和直流子网的协同控制的目的, 其过程如图 6 所示。

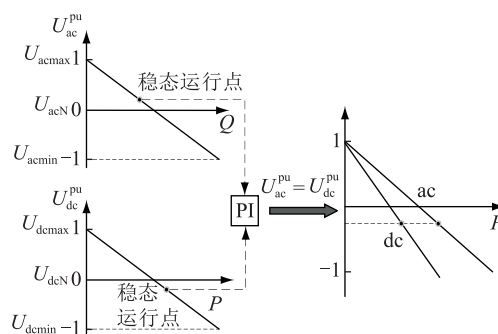


图 6 交直流混合配电网互动支撑控制过程

Fig.6 Interactive support control process of AC/DC hybrid distribution network

用  $g$  代表交流子网同一化电压和直流子网同一化电压的差值:

$$g = U_{\text{ac}}^{\text{pu}} - U_{\text{dc}}^{\text{pu}} \quad (11)$$

$g > 0$  表示交流子网要为直流子网提供功率支

撑, $g < 0$  则表示直流子网向交流子网输出功率。因此, $g$  的正负表示双向变流器的功率传输方向。通过 PI 控制器可以得到 IC 控制所需要的功率参考信号:

$$P^* = (k_p + k_i/s)g \quad (12)$$

式中: $k_p$  为 PI 的比例系数; $k_i$  为 PI 的积分系数。

### 3.3 交流子网与直流子网分布式无功电压互动控制策略

采用基于多代理系统的控制方法,其收敛速度是控制中的关键点,分布式控制的收敛速度决定了系统能否在最快的时间范围内完成无功电压控制,实现时间上的优化。但有时系统通信拓扑结构的改变和系统工况的变化会对控制的收敛时间产生影响。对此,文中提出一种有限时间控制的无功电压控制方法,先由改进后的下垂控制对系统无功进行分配,然后通过有限时间控制对交流分布式电源和双向变流器进行无功电压互动控制。将配电网中的各个分布式电源看作一个通信代理,每个通信代理只和与自身相邻的通信代理进行无功通信,通过二次控制,实现交流子网与直流子网的无功电压互动,且使所有通信代理无功增量达到一致。

配电网的无功变量系统为:

$$\dot{x}_i = Q_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

式中: $\dot{x}_i$  是第  $i$  个分布式电源的状态变量; $Q_i$  为第  $i$  个控制对象的控制输入量。所有代理仅和相邻的单元交互状态信息。

有限时间控制方程为:

$$\dot{x}_i = b \left\{ f \left[ \sum_{j \in N_i} m_{ij} (Q_j - Q_i) \right] \left| \sum_{j \in N_i} m_{ij} (Q_j - Q_i) \right|^a \right\} + c \sum_{j \in N_i} m_{ij} (Q_j - Q_i) \quad (14)$$

式中: $a, b, c$  为该控制系数,且  $0 < a < 1, b > 0, c \geq 0$ ;  $N_i$  为代理集合; $m_{ij}$  为权重因子, $m_{ij} \geq 0$ ,当 2 个分布式电源间不进行通信时,它们的权重因子为零。且:

$$f(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (15)$$

一致性算法中,系统的通信拓扑由权重因子  $m_{ij}$  反应。可以通过一种优化的 Metropolis 算法对  $m_{ij}$  进行自适应调节,如式(16)所示:

$$m_{ij} = \begin{cases} k/[(n_i + n_j)/2] & j \in N_i \\ 1 - \sum_{j \in N_i} k/[(n_i + n_j)/2] & j = i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $n_i, n_j$  分别为与第  $i$  个和第  $j$  个通信单元进行通

信的数量; $k$  为收敛系数,其大小能决定同一拓扑下系统收敛的快慢, $0 < k < 1$ 。

对交流分布式电源和双向变流器进行二次控制,提高交流子网与直流子网的互动支撑能力。通过二次控制的迭代结果对一次控制进行无功补偿,从而实现无功电压互动控制。如下式所示:

$$Q = Q_0 + (U_0 - U)K_U + Q_\delta \quad (17)$$

式中: $Q_\delta$  为系统无功补偿值,可以由有限时间一致性控制得到。

分布式电源逆变器控制如图 7 所示,配电网中各分布式电源的分布式通信控制如图 8 所示,Agent 为通信代理。

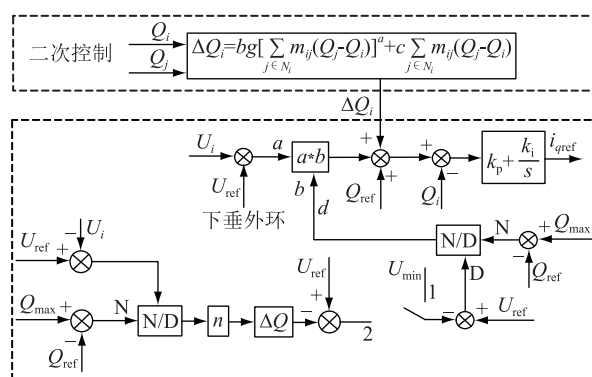


图 7 分布式电源逆变器控制

Fig.7 Inverter control of distributed power

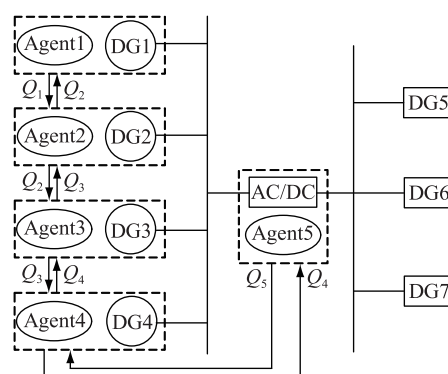


图 8 交直流混合配电网分布式控制结构

Fig.8 Distributed control architecture of AC/DC hybrid distribution network

## 4 仿真与分析

为了验证所提无功电压控制方法的效果,在电力系统仿真软件 PSCAD/ EMTDC 中搭建交直流混合配电网仿真模型。如图 9 所示,在配电网无功负荷变化的仿真场景下进行仿真,验证交流子网与直流子网的无功电压互动支撑能力。

交流子网初始无功负荷为 20 kvar,含有 4 个并网的分布式电源;直流子网含有 3 个并网的分布式电源。



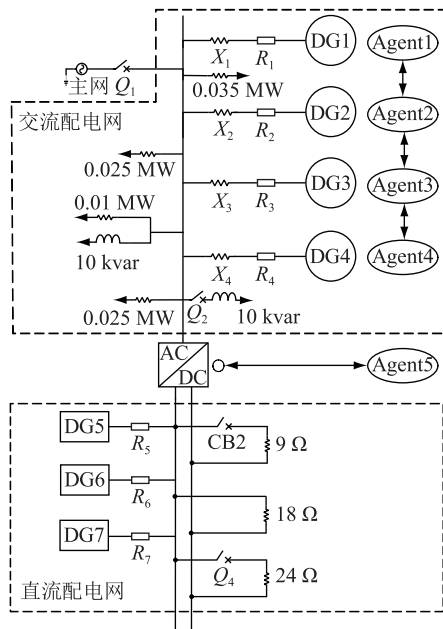


图9 交直流混合配电网仿真结构

Fig.9 Simulation structure of AC/DC hybrid distribution network

#### 4.1 交流子网无功负荷增加

在场景 A 中,  $t=3\text{ s}$  时, 交流子网无功负荷增加  $10\text{ kvar}$ , 分布式电源通过一次控制加大无功出力。交直流子网间进行协调控制, 配电网 DG1—DG4 和直流子网通过双向变流器对系统增发无功功率。

分布式电源的二次控制的一致性迭代如图 10 所示,  $\Delta Q_1—\Delta Q_4$  为交流子网,  $\Delta Q_5$  为直流子网。控制过程中, 有限时间控制的分布式电源进行 10 次就达到了收敛。运用传统迭代方式进行迭代则需要 16 次才达到收敛。

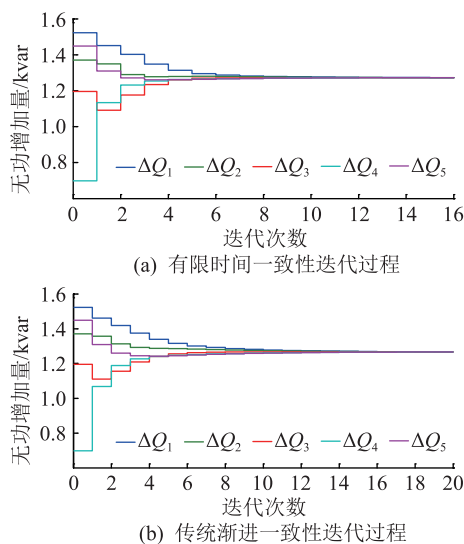


图10 无功负荷增加下一致性迭代过程

Fig.10 Consistency iterative process with increased reactive power load

系统交流母线电压如图 11 所示,  $3\text{ s}$  时系统出现扰动, 母线电压出现波动, 改进的下垂控制策略启动, 调整下垂系数, 使分布式电源输出适应新的负荷, 母线电压恢复至额定电压。各分布式电源的无功功率如图 12 所示,  $3\text{ s}$  时系统一次控制策略启动, 交流子网内的各分布电源增发无功功率, 直流子网通过变流器向交流子网提供无功支撑, 交直流子网间进行协调控制; 在  $3.5\text{ s}$  时系统二次控制启动, 各分布式电源和双向变流器与相邻通信单元进行无功信息交互和迭代计算, 交流子网与直流子网互动运行 (如图 10 所示), 得到自身无功出力修正值, 修正自身无功出力, 使系统无功合理分配。

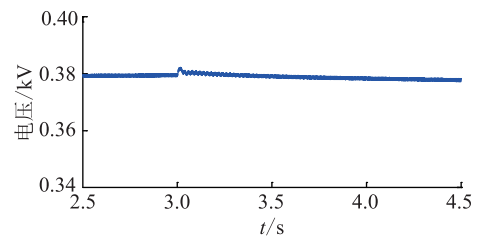


图11 交直流混合配电网无功负荷增加的母线电压曲线

Fig.11 Bus voltage curve of AC/DC hybrid distribution network with reactive load increasing

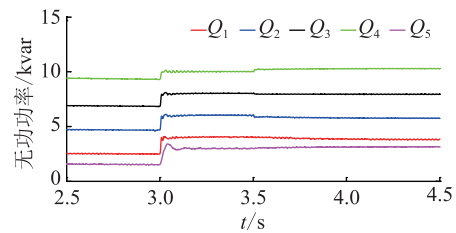


图12 交直流混合配电网无功负荷增加的无功功率曲线

Fig.12 Reactive power curve of increasing reactive power load in AC/DC hybrid distribution network

#### 4.2 交流子网无功负荷减少

场景 B 中  $t=3\text{ s}$  时, 交流子网无功负荷减少  $5\text{ kvar}$ , 分布式电源的二次控制的一致性迭代如图 13 所示。控制过程中, 有限时间控制的分布式电源进行 8 次就达到了收敛。运用传统迭代方式进行迭代则需要 13 次才达到收敛。

系统交流母线电压如图 14 所示,  $3\text{ s}$  时系统出现扰动, 母线电压出现波动, 改进的下垂控制策略启动, 调整下垂系数, 使分布式电源输出适应新的负荷, 母线电压恢复至额定电压。如图 15 所示, 与场景 A 相同,  $3.5\text{ s}$  时无功电压互动策略启动, 在交流子网无功负荷减少时, 交流子网内的各分布电源减发无功功率, 同时直流子网也减少其向交流子网提供的无功功率, 各分布式电源和双向变流器与相邻通信单元进行无功信息交互和迭代计算, 交流子

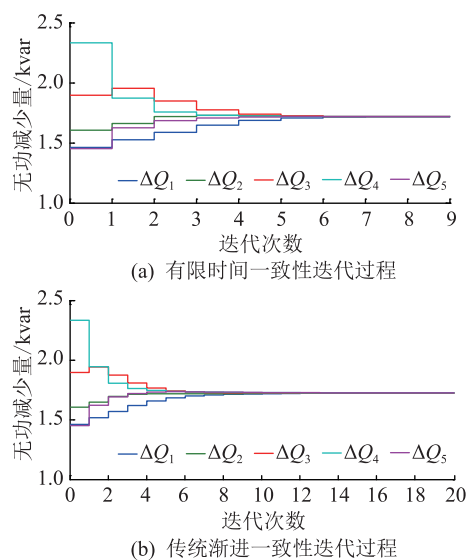


图 13 无功负荷减少下一致性迭代过程

Fig.13 Consistency iterative process with decreased reactive power load

网与直流子网互动运行(如图 13 所示),得到自身无功出力修正值,修正自身无功出力,实现交直流互动协调控制,实时动态修正分布式电源无功出力,使系统无功合理分配。

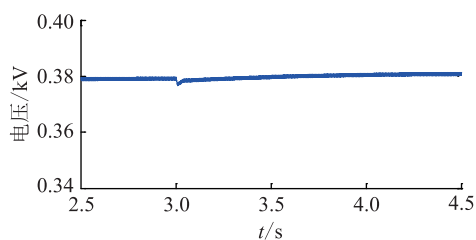


图 14 交直流混合配电网无功负荷减少的母线电压曲线

Fig.14 Bus voltage curve of AC/DC hybrid distribution network with reactive load decreasing

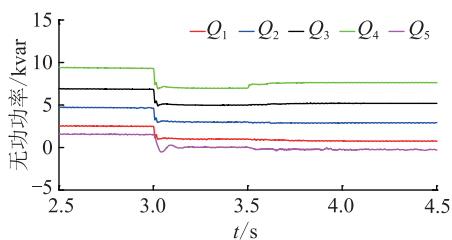


图 15 交直流混合配电网无功负荷减少的无功功率曲线

Fig.15 Reactive power curve of decreasing reactive power load in AC/DC hybrid distribution network

## 5 结语

文中提出了一种分布式电源无功电压互动控制方法,在恢复系统电压的同时,提高了下垂控制的无功功率均分精度,从而抑制系统无功环流,提高系统运行稳定性,并进行了多种场景下的仿真验

证,结果表明:

(1) 提出的计及交直流互动的混合配电网无功电压控制策略中,交直流子网通过双向变流器互动控制。通过一次协调互动控制配电网的双向变流器控制自身的整流与逆变状态,能使交流子网与直流子网进行功率交互。

(2) 构建的面向交直流混合配电网的分布式去中心化协同控制架构。利用多代理分布式一致性算法,在无需集中式控制器的情况下,仅邻居的代理间进行分布式的信息交互,通过有限时间控制,设置下垂控制无功参考值,实现了系统电压恢复和无功均分。

(3) 提出的有限时间控制方法提升了分布式协同无功电压控制的收敛性能,使系统拥有相对一般的控制方法及更快的收敛速度,能让配电网可以在有限时间内达到无功电压互动支撑效果,在系统发生各种扰动的情况下,也能有很好的控制效果。

本文得到国网河北省电力有限公司科技项目(5204BB170008)资助,谨此致谢!

## 参考文献:

- [1] 宋旭东,张晓平,余南华,等. 考虑分布式能源接入的配电网规划及其关键技术综述[J]. 智慧电力,2015,43(3):38-42. SONG Xudong, ZHANG Xiaoping, YU Nanhua, et al. A review of distribution network plan considering the access of DC and its key technologies[J]. Smart Power, 2015, 43(3):38-42.
- [2] 蒋贤强,徐青山,柳丹,等. 含分布式电源的交直流配网双层规划研究[J]. 电力工程技术,2018,37(4):27-32. JIANG Xianqiang, XU Qingshan, LIU Dan, et al. Planning research of AC/DC distribution network containing DGs using two-layer model [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4):27-32.
- [3] 李虎成,袁宇波,卞正达,等. 面向特高压交直流大受端电网的频率紧急控制特性分析[J]. 电力工程技术,2017,36(2):27-31,109. LI Hucheng, YUAN Yubo, BIAN Zhengda, et al. The frequency emergency control characteristic analysis for UHV AC/DC large receiving end power grid [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2):27-31,109.
- [4] 李敬如,韩丰,姜世公,等. 能源互联网环境下交直流混合配电网系统关键技术[J]. 中国电力,2018,51(8):56-63. LI Jingru, HAN Feng, JIANG Shigong, et al. Key technologies of AC/DC hybrid distribution system in energy internet environment[J]. Electric Power, 2018, 51(8):56-63.
- [5] 赫卫国,程军照,王文玺,等. 含分布式光伏发电的配电网电压越界调节策略[J]. 电力需求侧管理,2017,19(6):19-24. HE Weiguo, CHENG Junzhao, WANG Wenxi, et al. Voltage transboundary regulation strategy for distribution network with distributed photovoltaic generation [J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(6):19-24.

- [6] 何英静,李帆,沈舒仪,等. 新能源及分布式电源接入浙江配电网适应性研究[J]. 浙江电力,2018,37(1):32-36.  
HE Yingjing, LI Fan, SHEN Shuyi, et al. Adaptability research on integration of new energy and distributed generation into Zhejiang distribution networks[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(1):32-36.
- [7] 周金辉,盛晔,苏义荣,等. 含高比例光伏的配电网电压协调控制策略研究[J]. 浙江电力,2018,37(4):7-13.  
ZHOU Jinhui, SHENG Ye, SU Yirong, et al. Research on coordinated distribution network voltage control strategy with high proportion photovoltaics [J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(4):7-13.
- [8] 严道. 交直流混合配电网及其控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.  
YAN Xiao. Research on AC/DC hybrid distribution network and its control strategy[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2017.
- [9] 陈潇鹏. 交直流配电网优化运行关键技术及仿真研究[D]. 南京:东南大学,2017.  
CHEN Xiaopeng. Key technology and simulation research on optimized operation of AC/DC distribution network[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [10] 顾乔根,吕航,王玉龙,等. 交直流碰线故障对变压器差动保护影响的实证分析[J]. 电力工程技术,2018,37(6):126-132.  
GU Qiaogen, LYU Hang, WANG Yulong, et al. Empirical study of the influence of AC/DC touch fault on transformer differential protection [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 126-132.
- [11] 卢毓东,魏宏,王芙丽,等. 能源互联网背景下的客户侧分布式电源综合运营服务平台及其关键技术研究[J]. 浙江电力,2017,36(10):77-82.  
LU Yudong, WEI Hong, WANG Fuli, et al. Research on integrated operation service platform for distribution power supply at customer side and key technologies under the context of energy internet[J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 36(10):77-82.
- [12] 赵艳龙,李勤超,周立中. 配电网线路及其智能配变无功状态在线监测平台设计与应用[J]. 浙江电力,2017,36(11):57-60.  
ZHAO Yanlong, LI Qincao, ZHOU Lizhong. Design and development of on-line monitoring platform of reactive power for distribution lines and intelligent transformers[J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 36(11):57-60.
- [13] 张学,裴玮,邓卫,等. 交直流混合配电网的运行模式和协调控制方法[J]. 供用电, 2016, 33(8): 27-31.  
ZHANG Xue, PEI Wei, DENG Wei, et al. The concept and demonstration project of flexible interconnection of urban power grid partition[J]. Power Supply, 2016, 33(8): 27-31.
- [14] 张学,裴玮,范士雄,等. 含多端柔性互联装置的交直流混合配电网协调控制方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(7):185-191.  
ZHANG Xue, PEI Wei, FAN Shixiong, et al. Coordinated control method of AC/DC hybrid distribution network with multi-terminal flexible interconnection devices[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7):185-191.
- [15] YAO W, CHEN M, MATAS J, et al. Design and analysis of the droop control method for parallel inverters considering the impact of the complex impedance on the power sharing [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 576-588.
- [16] 陈奎,张云,王洪寅,等. 基于免疫算法的含分布式电源配电网的故障定位[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(24):57-62.  
CHEN Kui, ZHANG Yun, WANG Hongyin, et al. Fault location of distribution network with distributed generation based on immune algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 57-62.
- [17] 殷自力,郑佩祥,陈宇星,等. 含电动汽车和分布式电源的配电网的可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(24):77-83.  
YIN Zili, ZHENG Peixiang, CHEN Yuxing, et al. Reliability evaluation of distribution networks with electric vehicles and distributed power sources [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 77-83.
- [18] 王艳松,刘珊,衣京波,等. 基于状态估计的含分布式电源树状配电网故障测距算法[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(23):60-67.  
WANG Yansong, LIU Shan, YI Jingbo, et al. Fault location algorithm for tree-shaped distribution network with distributed generation based on state estimation [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 60-67.
- [19] 孟明,朱国林,魏怡. 基于最优潮流的交直流配电网分层控制策略[J]. 电力建设,2018,39(8):94-101.  
MENG Ming, ZHU Guolin, WEI Yi. Hierarchical control strategy for AC/DC distribution network based on optimal power flow[J]. Power Construction, 2018, 39(8): 94-101.
- [20] 彭克,咸日常,张新慧,等. 多端互联交直流配电网的潮流分层控制策略及算法[J]. 电力系统自动化,2016,40(14):72-77.  
PENG Ke, XIAN Richang, ZHANG Xinhui, et al. Power flow layered control strategy and algorithm for multi-terminal interconnected AC/DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 72-77.
- [21] 张璐,唐巍,梁军,等. 基于VSC的交直流混合中压配电网功率-电压协调控制[J]. 中国电机工程学报,2016,36(22):6067-6075.  
ZHANG Lu, TANG Wei, LIANG Jun, et al. Power-voltage coordinated control of AC/DC hybrid medium voltage distribution network based on VSC [J]. Journal of Chinese Electrical Engineering Science, 2016, 36(22): 6067-6075.
- [22] 罗松青,袁志昌,张海波,等. 抑制交直流配电网间功率波动的控制策略[J]. 广东电力,2017,30(4):102-107,130.  
LUO Songqing, YUAN Zhichang, ZHANG Haibo, et al. Control strategy for suppressing power fluctuation between AC and DC distribution networks[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30

- (4): 102-107,130.
- [23] SUN Kai, WANG Xiaosheng, LI Yunwei, et al. Parallel operation of bidirectional interfacing converters in a hybrid AC/DC microgrid under unbalanced grid voltage conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32 (3): 1872-1884.
- [24] SHAFIEE Q, GUERRERO J M, VASQUEZ J C. Distributed secondary control for islanded microgrids—a novel approach [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2014, 29 (2): 1018-1031.
- [25] SHAFIEE Q, STEFANOVIC C, DRAGICEVIC T, et al. Robust networked control scheme for distributed secondary control of

islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61 (10): 5363-5374.

作者简介:



耿少博

耿少博(1986),男,硕士,工程师,从事电气工程及新能源运行控制相关工作(E-mail: genshaobo123@163.com);

顾乔根(1986),男,硕士,工程师,从事电力系统继电保护相关工作;

常风然(1967),男,学士,教授级高级工程师,从事主动配电网及继电保护相关工作。

## Distributed reactive voltage and voltage interactive control strategy for AC/DC hybrid distribution network

GENG Shaobo<sup>1</sup>, GU Qiaogen<sup>2,3</sup>, CHANG Fengran<sup>1</sup>, SUN Liqiang<sup>1</sup>, WANG Qiang<sup>1</sup>, ZHANG Haining<sup>2,3</sup>

(1. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China;

2. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 3. NARI Group Cooperation

(State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** The reactive voltage control of AC/DC hybrid distribution network is the key problem to be solved to ensure its efficient and reliable operation. For this reason, a distributed reactive power and voltage interactive control strategy based on limited time control is proposed, which realizes the interactive reactive power and voltage support between AC subnet and DC subnet under the framework of no centralized controller. This method constructs a distributed decentralized cooperative control architecture. Achieve distributed consistency cooperation between multiple inverters with limited time control. At the same time, it can ensure the accurate division of reactive power increment, avoid the reactive power circulation problem between multiple drooping control inverters, and further improve the voltage quality. Compared with the traditional consistency strategy, the proposed strategy has faster convergence speed, and can adapt to various disturbances in system. In order to verify the cooperative interactive control effect of the control strategy, a simulation model of AC/DC hybrid distribution network is established in PSCAD/EMTDC. The effectiveness and adaptability of distributed interactive support and reactive power sharing strategy between AC subnet and DC subnet are verified under various operating conditions.

**Keywords:** AC/DC hybrid distribution network; reactive power and voltage control; interactive support; droop control

(编辑 钱悦)