

DOI: 10.7667/PSPC170627

三端柔性环网控制装置的功率调度模型与边界条件研究

赵国鹏, 何彦良

(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: 应用柔性环网控制装置将多个交流配电网互联形成环网, 具有实现系统有功无功独立解耦控制、提高系统安全性、降低运行风险等优点。基于此提出了一种三端柔性环网控制装置的功率模型和边界条件, 用于配电网的功率调度。首先, 通过搭建用于调度的三端柔性环网控制装置的模型, 得到其功率关系式。然后, 对功率调度的边界条件进行了理论分析, 通过理想化模型得到了工程实践中所需的功率调度范围, 同时建立了考虑综合安全边界条件的功率调度模式。针对两种情况, 提出了能够满足不同条件的功率分配结果。最后, 通过仿真结果, 验证了三端柔性环网控制装置功率调度模型与边界条件的有效性。

关键词: 柔性环网控制装置; 功率调度模型; 边界条件; 配电网

Research on power dispatch model and boundary condition of three-terminal flexible loop network controller

ZHAO Guopeng, HE Yanliang

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

Abstract: Flexible Loop Network Controller (FLNC) is applied to interconnect multiple AC distribution networks into a loop network, which can realize active and reactive power independent decoupling control, improve system security, decrease operating risks, etc. On this basis, a power model and boundary conditions of three-terminal FLNC for power dispatch of distribution network is presented. First, through building the model of three-terminal FLNC for power dispatch, the power relationship formula is presented. Second, the boundary conditions of power dispatch are theoretically analyzed. Then, the scope of power dispatch needed in engineering practice is obtained through an idealized model, and the power dispatch modes considering comprehensive security boundary conditions are established. According to two different situations, the power allocation results which can meet the different conditions are proposed. Finally, the simulation results verify the effectiveness of the three-terminal FLNC power dispatch model and the boundary conditions.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050102).

Key words: flexible loop network controller; power dispatch model; boundary condition; distribution network

0 引言

随着我国城市化建设的不断推进, 电力电子装置在配电系统中的应用已经日益广泛。配电网的损耗及无功补偿, 过电压及其保护措施, 供电可靠性和电能质量等都需要用到电力电子装置。但是随着社会对供电可靠性、电能质量等要求不断提高, 配电网面临向高可靠性、高效率、低耗能转型, 为满

足城市供电发展的新需求, 基于柔性直流技术的交直流混合配电网是一种新的解决方案^[1-5]。

柔性环网控制装置是应用电力电子变流器设备将多个配电网进行互联形成环网。与传统的联络开关相比, 柔性环网控制装置可以改变配电网闭环设计、开环运行的方式, 避免传统联络开关换位时的冲击电流造成的安全隐患^[6], 降低系统运行风险和成本, 提高配电网拓扑的灵活性。考虑到供电可靠性、紧凑化设计等要求, 电力电子变流器背靠背结构是用于配电网调度的柔性环网控制装置采用的拓扑之一。它能够实现系统有功、无功功率的独

立解耦控制, 实现多馈线负荷均衡, 显著提高设备利用率^[7-9]。

用于功率调度的模型是柔性环网控制装置应用的基础, 文献[9-10]提出了换流器 P-Q 功率曲线, 给出了单个换流器的运行范围。文献[11-12]提出了两端背靠背系统的功率调度在高压直流输电中的应用, 即在安全运行范围内, 逆变端有功需求确定的前提下, 整流端向逆变端输送定量有功功率。但是三端背靠背系统存在多种工作状态, 功率调度较为复杂, 各端口之间的功率存在耦合现象, 以一端整流两端逆变为例, 各端口有无功功率输出, 整流端又需要向两个逆变端提供有功功率, 这样六个功率变量中部分存在耦合关系, 且系统容量存在约束范围, 目前并没有清晰的功率调度模型和边界条件, 基于此, 本文首先提出了一种用于调度的三端柔性环网控制装置的功率模型, 并基于该模型提出了三端柔性环网控制装置的功率边界条件。

1 三端柔性环网控制装置的功率模型

以 A 端整流, B、C 两端逆变为例, 三端柔性环网控制装置的单相拓扑如图 1 所示, $R+jX$ 是装置交流侧阻抗, R 是变流器内部损耗等效为交流侧电阻和线路损耗之和^[13], X 是装置交流侧滤波电抗, 通常情况下柔性环网控制装置的损耗 P_{Loss} 约为视在功率的 3%~5%^[14]。

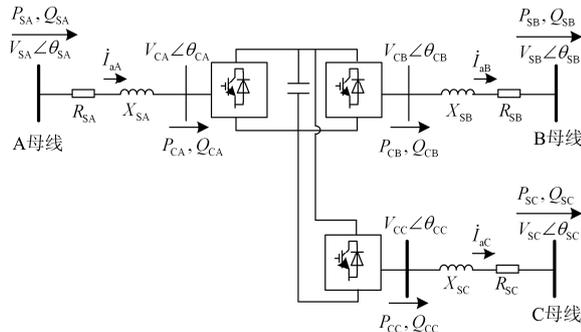


图 1 三端柔性环网控制装置的单相拓扑图

Fig. 1 Single phase topological graph of three-terminal FLNC

以 A 端为例进行有功功率和无功功率建模, 功率满足式(1)。

$$\dot{S}_A = P_A + jQ_A = \dot{V}_{SA} \dot{I}_{aA}^* \quad (1)$$

交流侧相电流如式(2)所示。

$$\dot{I}_{aA} = (\dot{V}_{SA} - \dot{V}_{CA}) / (R_{SA} + jX_{SA}) \quad (2)$$

$$\text{令 } \delta_{CA} = \theta_{SA} - \theta_{CA}, \quad |Y_{SA}| = 1 / \sqrt{R_{SA}^2 + X_{SA}^2},$$

$\varphi_A = \arctan(X_{SA} / R_{SA})$, 将式(1)代入式(2)可得 A 端有功功率和无功功率模型, 如式(3)所示。

$$\begin{cases} P_{SA} = -|Y_{SA}| V_{SA} V_{CA} \cos(\delta_{CA} + \varphi_A) + |Y_{SA}| V_{SA}^2 \cos(\varphi_A) \\ Q_{SA} = -|Y_{SA}| V_{SA} V_{CA} \sin(\delta_{CA} + \varphi_A) + |Y_{SA}| V_{SA}^2 \sin(\varphi_A) \\ P_{CA} = |Y_{SA}| V_{SA} V_{CA} \cos(\delta_{CA} - \varphi_A) - |Y_{SA}| V_{CA}^2 \cos(\varphi_A) \\ Q_{CA} = -|Y_{SA}| V_{SA} V_{CA} \sin(\delta_{CA} - \varphi_A) - |Y_{SA}| V_{CA}^2 \sin(\varphi_A) \end{cases} \quad (3)$$

如果不考虑损耗 R_{SA} , 模型可简化为式(4)。

$$\begin{cases} P_{SA} = \frac{V_{SA} V_{CA} \sin(\delta_{CA})}{X_{SA}} \\ Q_{SA} = \frac{V_{SA}^2 - V_{SA} V_{CA} \cos(\delta_{CA})}{X_{SA}} \\ P_{CA} = \frac{V_{SA} V_{CA} \sin(\delta_{CA})}{X_{SA}} \\ Q_{CA} = \frac{V_{SA} V_{CA} \cos(\delta_{CA}) - V_{CA}^2}{X_{SA}} \end{cases} \quad (4)$$

同理, 可得到 B 端和 C 端的有功功率和无功功率模型如式(5)所示。

$$\begin{cases} P_{Si} = |Y_{Si}| V_{Si} V_{Ci} \cos(\delta_{Si} + \varphi_i) - |Y_{Si}| V_{Si}^2 \cos(\varphi_i) \\ Q_{Si} = |Y_{Si}| V_{Si} V_{Ci} \sin(\delta_{Si} + \varphi_i) - |Y_{Si}| V_{Si}^2 \sin(\varphi_i) \\ P_{Ci} = -|Y_{Si}| V_{Si} V_{Ci} \cos(\delta_{Si} - \varphi_i) + |Y_{Si}| V_{Ci}^2 \cos(\varphi_i) \\ Q_{Ci} = -|Y_{Si}| V_{Si} V_{Ci} \sin(\delta_{Si} - \varphi_i) + |Y_{Si}| V_{Ci}^2 \sin(\varphi_i) \end{cases} \quad (i = B, C) \quad (5)$$

如果不考虑损耗 R_{SB} 、 R_{SC} , 模型可简化为式(6)。

$$\begin{cases} P_{Si} = -\frac{V_{Si} V_{Ci} \sin(\delta_{Ci})}{X_{Si}} \\ Q_{Si} = \frac{V_{Si} V_{Ci} \cos(\delta_{Ci}) - V_{Si}^2}{X_{Si}} \\ P_{Ci} = -\frac{V_{Si} V_{Ci} \sin(\delta_{Ci})}{X_{Si}} \\ Q_{Ci} = \frac{V_{Si} V_{Ci} \cos(\delta_{Ci}) + V_{Ci}^2}{X_{Si}} \end{cases} \quad (i = B, C) \quad (6)$$

如果不考虑柔性环网控制装置损耗, 那么 A 端输入的有功功率与 B 端和 C 端输出的有功功率总和相等; 考虑柔性环网控制装置损耗, A 端输入的有功和装置损耗(P_{Loss})相减后与 B 端和 C 端输出的有功功率总和相等。可得式(7)和式(8)。

$$P_{CA} = \frac{V_{SA} V_{CA} \sin(\delta_{CA})}{X_{SA}} = P_{CB} + P_{CC} = -\left[\frac{V_{SB} V_{CB} \sin(\delta_{CB})}{X_{SB}} + \frac{V_{SC} V_{CC} \sin(\delta_{CC})}{X_{SC}} \right] \quad (7)$$

$$P_{CA} = P_{CB} + P_{CC} + P_{Loss} \quad (8)$$

综上所述,用于调度的三端柔性环网控制装置功率模型如式(9)所示。

$$\begin{cases} P_{CA} = \frac{V_{SA}V_{CA} \sin(\delta_{CA})}{X_{SA}} \\ Q_{CA} = \frac{V_{SA}V_{CA} \cos(\delta_{CA}) - V_{CA}^2}{X_{SA}} \\ P_{CB} = -\frac{V_{SB}V_{CB} \sin(\delta_{CB})}{X_{SB}} \\ Q_{CB} = \frac{V_{SB}V_{CB} \cos(\delta_{CB}) + V_{CB}^2}{X_{SB}} \\ P_{CC} = -\frac{V_{SC}V_{CC} \sin(\delta_{CC})}{X_{SC}} \\ Q_{CC} = \frac{V_{SC}V_{CC} \cos(\delta_{CC}) + V_{CC}^2}{X_{SC}} \\ P_{CA} = P_{CB} + P_{CC} + P_{Loss} \end{cases} \quad (9)$$

2 三端柔性环网控制装置的功率边界条件

2.1 单相功率调度的边界条件

单相功率边界示意图见图 2。

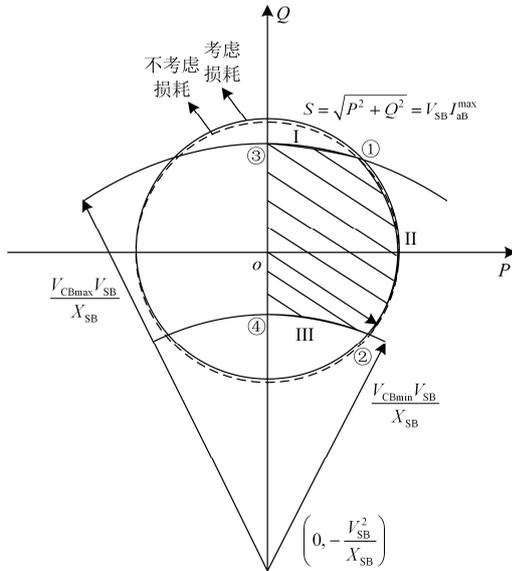


图 2 单相功率边界示意图

Fig. 2 Schematic diagram of single phase power boundary

相电流最大值的轨迹在有功功率和无功功率图中是一个圆心在原点,半径为 $V_{SB}I_{ab}^{\max}$ 的圆,如式(10)所示^[15]。

$$V_{SB}I_{ab}^{\max} = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (10)$$

实线圆为考虑装置损耗为 3%时的轨迹,虚线圆为不考虑装置损耗的理想化模型轨迹。忽略损耗

的影响,变流器端口电压 V_{CB} 取决于式(11)和式(12)。

$$P = -\frac{V_{SB}V_{CB} \sin(\delta_{CB})}{X_{SB}} \quad (11)$$

$$Q = -\frac{V_{SB}^2}{X_{SB}} + \frac{V_{SB}V_{CB}}{X_{SB}} \cos(\delta_{CB}) \quad (12)$$

整理消去 $\sin(\delta_{CB})$ 和 $\cos(\delta_{CB})$ 后,可得式(13)。

$$\sin^2 \delta_{CB} + \cos^2 \delta_{CB} = 1 = \left(\frac{PX_{SB}}{V_{SB}V_{CB}}\right)^2 + \left[\left(Q + \frac{V_{SB}^2}{X_{SB}}\right) \frac{X_{SB}}{V_{SB}V_{CB}}\right]^2 \quad (13)$$

这样,在 P/Q 图中就产生了一段以 $(0, -V_{SB}^2/X_{SB})$ 为圆心,以 $V_{SB}V_{CB}/X_{SB}$ 为半径的圆弧,如式(14)所示。

$$\left(\frac{V_{SB}V_{CB}}{X_{SB}}\right)^2 = P^2 + \left(Q + \frac{V_{SB}^2}{X_{SB}}\right)^2 \quad (14)$$

而变流器端口电压 V_{CB} 本身也有最大值和最小值,其中 $V_{CB\max}$ 是为了避免过调压, $V_{CB\min}$ 是为了防止欠压^[16]。

2.2 简化单相功率调度的边界条件

在图 1 所给出的主电路结构中,A 端为整流端,系统发出有功功率,注入变流器;B、C 端为逆变端,有功功率由变流器向系统注入,所以变流器的功率范围表示为图 2 中阴影部分。

如表 1 所示,当 q_1 和 q_3 的差值 Δq_1 、 q_2 和 q_4 的差值 Δq_2 非常小(可忽略不计),则弧段 I 和 III 可趋于直线。

表 1 各交点详细说明

Table 1 Detailed description of each intersection

交点	纵坐标	相交曲线
①	q_1	圆 $\sqrt{P^2 + Q^2} = V_{SB}I_{ab}^{\max}$ 和弧 $\left(\frac{V_{SB}V_{CB\max}}{X_{SB}}\right)^2 = P^2 + \left(Q + \frac{V_{SB}^2}{X_{SB}}\right)^2$
②	q_2	圆 $\sqrt{P^2 + Q^2} = V_{SB}I_{ab}^{\max}$ 和弧 $\left(\frac{V_{SB}V_{CB\min}}{X_{SB}}\right)^2 = P^2 + \left(Q + \frac{V_{SB}^2}{X_{SB}}\right)^2$
③	q_3	弧 $\left(\frac{V_{SB}V_{CB\max}}{X_{SB}}\right)^2 = P^2 + \left(Q + \frac{V_{SB}^2}{X_{SB}}\right)^2$ 和 Q 轴
④	q_4	弧 $\left(\frac{V_{SB}V_{CB\min}}{X_{SB}}\right)^2 = P^2 + \left(Q + \frac{V_{SB}^2}{X_{SB}}\right)^2$ 和 Q 轴

以额定容量 50 MVA 的电网为例,给出表 2 中功率边界的计算参数。

表 2 功率边界的计算参数

Table 2 Calculation parameters of power boundary

系统总容量 50 MVA	单端容量 16 MVA	单相容量 5.33 MVA
相电压 V_{SB} 5.77 kV	相电流 I_{ab} 0.924 kA	连接阻抗 X_{SB} 0.628 Ω
端口电压最大值 $V_{CB\max}$	端口电压最小值 $V_{CB\min}$	
1.1 V_{SB}	0.9 V_{SB}	

将计算参数代入表 1 中的相交曲线计算得到, 差值 Δq_1 和 Δq_2 均为 0.02 Mvar, 所以可忽略不计, 得到简化的功率调度边界图(图 3)。

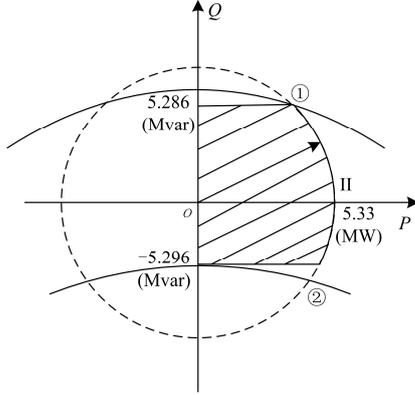


图 3 简化单相功率边界示意图

Fig. 3 Simplified schematic diagram of single phase power boundary

如图 3 所示, 计算得到 $q_1=5.286$ Mvar, $q_2=-5.314$ Mvar, $q_3=5.309$ Mvar, $q_4=-5.296$ Mvar, 则单相的有功功率取值为(0, 5.33) MW, 无功功率取值为(-5.296, 5.286) Mvar。单端的有功功率取值为(0, 16) MW, 无功功率取值为(-15.888, 15.858) Mvar。

2.3 三端柔性环网控制装置的功率边界与应用

通常电网调度分为两种模式: (1) 已知各端无功功率 Q , 对有功功率 P 进行调度; (2) 先不考虑无功功率 Q , 对有功功率 P 进行调度, 剩余无功用于无功补偿。

2.3.1 功率调度模式一下的边界条件

以 A 端整流, B、C 两端逆变为例, 由单相容量 $S=5.33$ MVA 可得 $P_{CA}=\sqrt{S^2-Q_{CA}^2}=\sqrt{28.42-Q_{CA}^2}$, 同理可得: $P_{CB}=\sqrt{28.42-Q_{CB}^2}$, $P_{CC}=\sqrt{28.42-Q_{CC}^2}$ 。在各端无功已知的情况下, 如果不考虑损耗, 则有功功率表示为

$$P_{CA} = P_{CB} + P_{CC} = \sqrt{28.42 - Q_{CB}^2} + \sqrt{28.42 - Q_{CC}^2} \quad (15)$$

整流 A 端 $P_{CA} \geq 0$, 得 $0 \leq P_{CA} \leq \sqrt{28.42 - Q_{CB}^2} + \sqrt{28.42 - Q_{CC}^2}$, 其中 Q_{CB} 和 Q_{CC} 的取值均为(-5.296, 5.286) Mvar。用 Matlab 绘出了 P_{CA} 、 Q_{CB} 和 Q_{CC} 的功率调度区域图, 如图 4 所示。图中 Z 轴表示 P_{CA} , X 轴表示 Q_{CB} , Y 轴表示 Q_{CC} 。

为了更清楚地说明三维图的意义, 将实际值用标么值表示, 并给出了从 X 轴方向看过去的平面示意图。

假设 $S_A=S_B=S_C=S$, 则式(15)可以变为

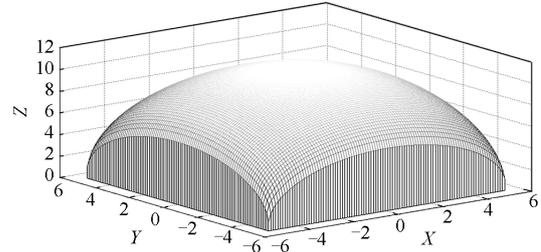


图 4 三端功率调度范围图

Fig. 4 Range diagram of three-terminal power dispatch

$$P_{CA} = \sqrt{S_B^2 - Q_{CB}^2} + \sqrt{S_C^2 - Q_{CC}^2} = \sqrt{S^2 - Q_{CB}^2} + \sqrt{S^2 - Q_{CC}^2} \quad (16)$$

由标么值表示为

$$\frac{P_{CA}}{S} = \sqrt{1 - \frac{Q_{CB}^2}{S^2}} + \sqrt{1 - \frac{Q_{CC}^2}{S^2}} \quad (17)$$

$$P_{CA_pu} = \sqrt{1 - Q_{CB_pu}^2} + \sqrt{1 - Q_{CC_pu}^2} \quad (18)$$

在模式一中, P_{CA_pu} 的最大值为 1.0, 而 P_{CA_pu} 的调度边界由 $P_{CA_pu} = \sqrt{1 - Q_{CA_pu}^2}$ 所确定, 如图 5 所示。 Q_{CB_pu} 和 Q_{CC_pu} 已知, 可以得到交点 A, 将点 A 投影到 P_{CA_pu} 轴上得到点 B, 线段 OB 为 $P_{CB_pu}+P_{CC_pu}$ 的范围, 即逆变端有功之和的调度区间。再由 Q_{CA_pu} (线段 OC)可以得到 P_{CA_pu} (线段 OD), 线段 OD 是整流端有功调度区间, 线段 OB 与线段 OD 的交集(线段 OE)即为逆变端最终的有功之和, 也即 P_{CA_pu} 。有功之和调度区间确定后, 分配 B 端和 C 端的有功功率, 例如线段 OE 为 P_{CB_pu} , 线段 OF 为 P_{CC_pu} , 满足线段长度 OE+OF=OD 即可。

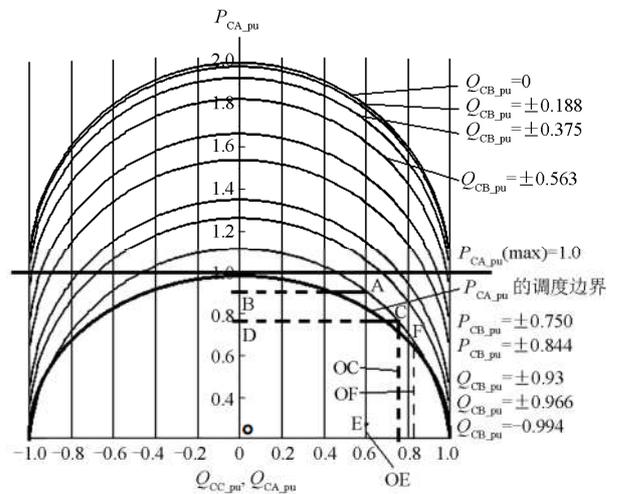


图 5 三端功率调度范围平面图(模式一 标么值)

Fig. 5 Range plane diagram of three-terminal power dispatch (model A, per-unit value)

如图 6 所示, 按单相进行举例分析。已知 Q_{CB} 和 Q_{CC} 分别为 5.15 Mvar(0.966 p.u.)和 4.26 Mvar (0.8 p.u.), 根据图 5 可得逆变端有功之和的调度区间为(0, 4.82) MW。已知 $Q_{CA}=4.0$ Mvar(0.750 p.u.), 根据 P_{CA} 的调度边界, 可得整流端有功调度区间为 (0, 3.52) MW, 所以逆变端最终的有功之和, 也即 $P_{CA}=3.52$ MW。最后调度可自行分配 B 端和 C 端的有功为 $P_{CB}=1.55$ MW、 $P_{CC}=1.98$ MW。

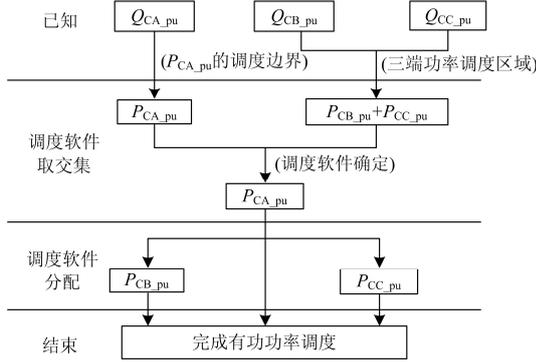


图 6 三端功率调度流程图

Fig. 6 Flow chart of three-terminal power dispatch

2.3.2 功率调度模式二下的边界条件

在模式二中, P_{CA_pu} 已知, 先通过调度软件分配得到 P_{CB_pu} 和 P_{CC_pu} , 如图 7 所示^[17]。

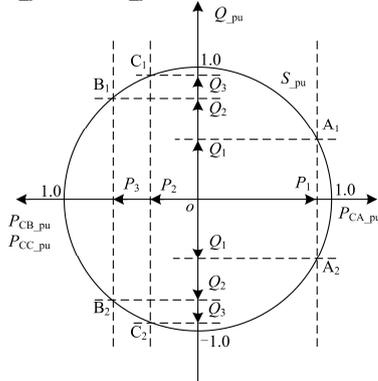


图 7 三端功率调度范围平面图(模式二, 标么值)

Fig. 7 Range plane diagram of three-terminal power dispatch (model B, per-unit value)

P_1 、 P_2 、 P_3 分别为 ABC 三端单相有功功率的标么值, 通过功率边界 S_{pu} 找到 ABC 三端对应的运行点分别为 A_1 和 A_2 、 B_1 和 B_2 、 C_1 和 C_2 , 最后调度软件通过运行点找到三端对应的无功功率分别为 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 。

3 三端柔性环网控制装置的功率分配结果

3.1 功率分配结果一

如图 8 所示, 设 A 端为整流端, B、C 端为逆

变端, 分析一端整流两端逆变情况的功率分配结果。

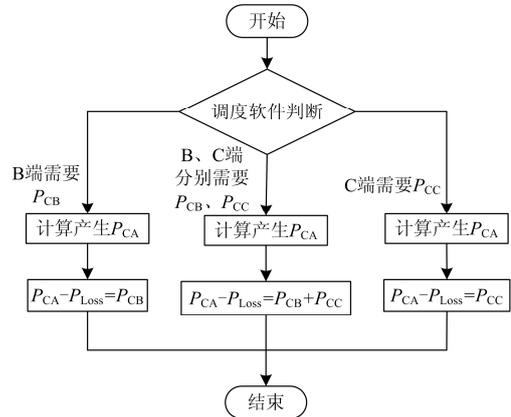


图 8 功率分配结果一的流程图

Fig. 8 Flow chart of power allocation of the first result

A 端采用定直流电压/无功功率控制($V_{dc}Q$)。B、C 端均采用有功无功控制(PQ)^[18-19]。在功率调度安全区域内, 已知各端无功可以确定各端的有功功率。设装置损耗 P_{Loss} 为已知量, 当 B、C 端分别需要有功功率为 P_{CB} 、 P_{CC} 时, 调度软件通过计算判断, 使 A 端在安全区域内产生所提供的有功功率 P_{CA} , 使得 $P_{CA}-P_{Loss}=P_{CB}+P_{CC}$ 。当 B、C 端只有一端需要有功功率为 P_{CB} 或 P_{CC} 时, 调度软件通过计算判断, 使得 $P_{CA}-P_{Loss}=P_{CB}$ 或 $P_{CA}-P_{Loss}=P_{CC}$ 。

3.2 功率分配结果二

如图 9 所示, 设 A、B 端为整流端, C 端为逆变端。分析两端整流一端逆变情况的功率分配结果。

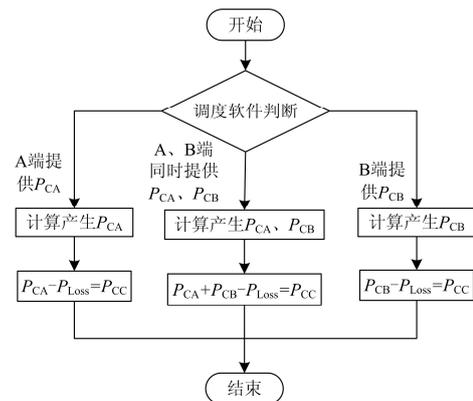


图 9 功率分配结果二的流程图

Fig. 9 Flow chart of power allocation of the second result

A 端采用定直流电压/无功功率控制($V_{dc}Q$), B、C 端均采用有功无功控制(PQ)。同理, 当 C 端需要有功功率为 P_{CC} , 调度软件通过计算判断, 可以由一个整流器完成提供时, 使 A 端或 B 端在安全区域内产生所提供的有功功率 P_{CA} 或 P_{CB} , 使得 $P_{CA}-P_{Loss}=P_{CC}$ 或 $P_{CB}-P_{Loss}=P_{CC}$ 。当 P_{CC} 超过了单个

整流器所能提供的最大功率时，调度软件通过计算判断，使 A、B 端在安全区域内产生所提供的有功功率 P_{CA} 、 P_{CB} ，使得 $P_{CA}+P_{CB}-P_{Loss}=P_{CC}$ 。

4 仿真验证

本文通过搭建 PSCAD/EMTDC 仿真模型，模拟了额定容量为 50 MVA 的电网功率调度，验证了三端柔性环网控制装置功率调度模型的有效性和功率边界条件的正确性。具体参数见表 3、表 4。

表 3 三端柔性环网控制装置的系统参数

Table 3 System parameters of three-terminal FLNC

变流器	一次侧 电压/kV	二次侧 电压/kV	直流电压/ kV	额定容量/ MVA
A	10	5.77	40	16
B	10	5.77	40	16
C	10	5.77	40	16

表 4 三端柔性环网控制装置的线路参数

Table 4 Line parameters of three-terminal FLNC

变流器	交流侧连接电感/H	交流侧并联电容/ μ F	直流侧电容/ μ F
A	0.002	30	6 000
B	0.002	30	6 000
C	0.002	30	6 000

根据功率调度模式一，由 2.3.1 节中的单相例子推广到单端可得，各端无功功率分别为 $Q_{CA}=12.0$ Mvar， $Q_{CB}=15.45$ Mvar， $Q_{CC}=12.78$ Mvar。根据功率调度区域，确定 $P_{CA}=10.56$ MW，由调度软件分配得出 $P_{CB}=4.65$ MW、 $P_{CC}=5.94$ MW。

在 $t=0.4$ s 时，ABC 三端无功功率发生变化， $Q_{CA}=9.0$ Mvar(0.563 p.u.)， $Q_{CB}=15.0$ Mvar(0.938 p.u.)， $Q_{CC}=13.59$ Mvar(0.85 p.u.)。根据功率调度区域重新确定 $P_{CA}=13.23$ MW，由调度软件重新分配得出 $P_{CB}=10.56$ MW、 $P_{CC}=2.79$ MW。

直流侧电压 U_{dc} 见图 10，变流器端口三相电流见图 11—图 13。

如图 14 所示，在本次模拟 50 MVA 电网调度仿真中，以电流流入变流器为电流正方向，仿真时长为 $t=1.0$ s。 P_1 为整流端 A 所提供的有功功率， P_2 、 P_3

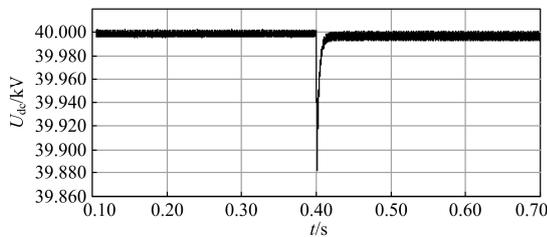


图 10 直流侧电压 U_{dc}
Fig. 10 DC side voltage

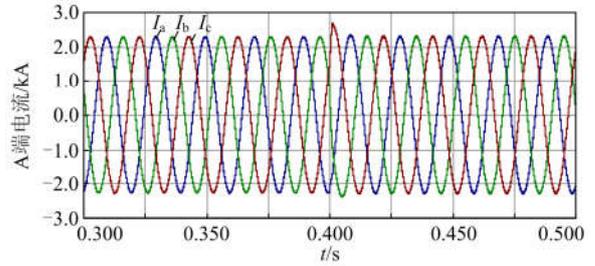


图 11 A 端变流器端口三相电流

Fig. 11 Converter port three-phase current of terminal A

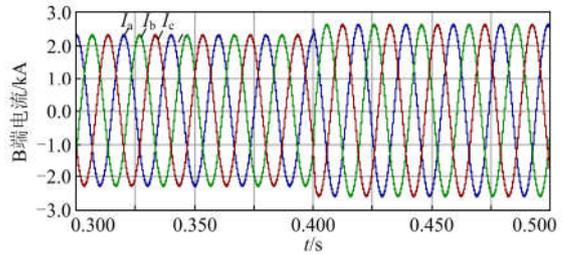


图 12 B 端变流器端口三相电流

Fig. 12 Converter port three-phase current of terminal B

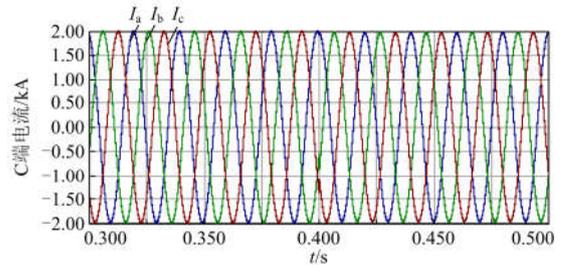


图 13 C 端变流器端口三相电流

Fig. 13 Converter port three-phase current of terminal C

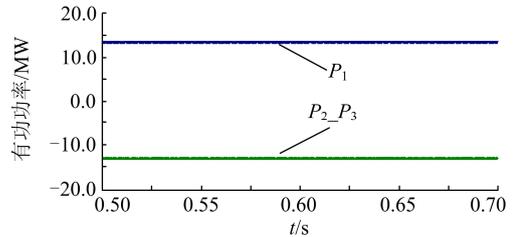
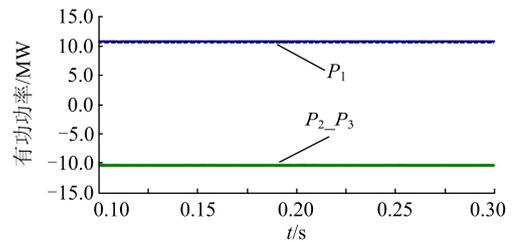


图 14 整流端和逆变端有功功率对比图

Fig. 14 Comparison of active power between rectifier and inverter

为逆变端 B、C 所接收的有功功率总和。 $t=0.0\sim 0.4$ s 时, $P_1=10.68$ MW, $P_2_P_3=-10.55$ MW, 功率误差约为 1.2%; $t=0.4\sim 1.0$ s 时, $P_1=13.40$ MW, $P_2_P_3=-13.25$ MW, 功率误差约为 1.1%。

根据功率调度模式二, 在已知各端有功功率的条件下, 通过调度运行边界找到各端对应的运行点, 再通过调度软件得到各端所需的无功功率。如图 15 所示, 以整流端吸收无功, 逆变端输出无功为例, 给出了各端无功的变化过程, 其中 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 分别为 A 端、B 端、C 端的无功功率。

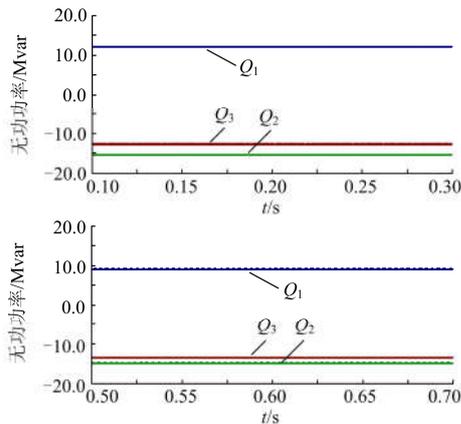


图 15 整流端和逆变端无功功率对比图

Fig. 15 Comparison of reactive power between rectifier and inverter

5 结论

1) 本文给出了三端柔性环网控制装置的功率模型, 通过已有的单个变流器功率边界条件, 推出了三端柔性环网控制装置的安全功率调度边界条件, 同时给出了功率调度的两种模式, 并进行了举例论证。

2) 根据功率调度模型, 给出了三端柔性环网控制装置的功率分配结果, 对调度软件的如何计算判断进行了详细说明。

3) 仿真模拟了额定容量为 50 MVA 的电网调度的变化过程, 验证了功率调度模型和边界条件的正确性, 即在确定好功率调度范围的前提下, 可以按照两种功率调度模式有效地实现有功功率或无功功率的调度。

参考文献

[1] 许火炬, 缪希仁. 交直流混合配电方式及其故障保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 139-146.

- XU Huoju, MIAO Xiren. A review of AC/DC hybrid distribution and fault protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 139-146.
- [2] 张树东, 朱大为, 刘闯, 等. 交直流混合配电型通用功率变换器(UPC)研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 48-55.
- ZHANG Shudong, ZHU Dawei, LIU Chuang, et al. Universal power converter (UPC) for hybrid AC and DC distribution[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 48-55.
- [3] 张宏俊, 吴越文, 陈卓, 等. 交直流配电网接纳分布式电源的实时仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 79-85.
- ZHANG Hongjun, WU Yuewen, CHEN Zhuo, et al. Real-time simulation of AC and DC distribution network to receive distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 79-85.
- [4] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
- TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [5] 邓健俊, 文安, 魏承志, 等. 含柔性直流输电的交直流并列系统有功潮流优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 118-123.
- DENG Jianjun, WEN An, WEI Chengzhi, et al. An optimization method for active power flow in AC/VSC-HVDC parallel transmission systems[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 118-123.
- [6] 王岸. SNOP 的研究及其在配电网中的应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [7] 高凯, 阳岳希, 张艳军, 等. 适用于城市电网的柔性环网控制器拓扑方案研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 78-85.
- GAO Kai, YANG Yuexi, ZHANG Yanjun, et al. A topology research of flexible looped network controller suitable to urban power grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 78-85.
- [8] 张项安, 张新昌, 李卫星, 等. 基于差动保护的配电网闭环运行方式探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 102-106.
- ZHANG Xiang'an, ZHANG Xinchang, LI Weixing, et al. On the closed-loop operation mode for differential protection-based distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 102-106.

- [9] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [10] BAHRMAN M P, JOHNSON B K. The ABCs of HVDC transmission technologies[J]. IEEE Power Energy Magazine, 2007, 5(2): 32-44.
- [11] JOHANSSON S, ASPLUND G, JANSSON E, et al. Power system stability benefits with VSC DC-transmission systems[C] // Proceedings of CIGRE 2004 Session, Aug. 29-Sep. 3, 2004, Paris, France: 1-8.
- [12] SONG Shaoqun, GUO Ruipeng, CHEN Feng, et al. A real-time power flow optimal control method for hybrid AC/DC power systems with VSC-HVDC[C] // Proceedings of ICSGEA2016, Aug. 11-12, Zhangjiajie, China, 26-30.
- [13] 刘昇, 徐政, 唐庚, 等. VSC-HVDC 机电暂态仿真建模及仿真[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1672-1677.
- LIU Sheng, XU Zheng, TANG Geng, et al. Electromechanical transient modeling and simulation for voltage source converter based HVDC power transmission[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1672-1677.
- [14] 张伟, 崔艳妍, 韦涛, 等. 柔性环网控制装置选址定容方法[J]. 电力建设, 2017, 38(3): 48-54.
- ZHANG Wei, CUI Yanyan, WEI Tao, et al. Locating and sizing method of flexible DC loop network controller[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(3): 48-54.
- [15] STIJN C. Steady-state and dynamic modelling of VSC HVDC systems for power system Simulation[D]. Belgium: Katholieke University Leuven, 2010.
- [16] BEERTEN J, COLE S, BELMANS R. Generalized steady-state VSC MTDC model for sequential AC/DC power flow algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 821-829.
- [17] 王成山, 孙充勃, 李鹏, 等. 基于 SNOP 的配电网运行优化及分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 82-87.
- WANG Chengshan, SUN Chongbo, LI Peng, et al. SNOP-based operation optimization and analysis of distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 82-87.
- [18] 熊凌飞, 韩民晓. 基于组合方式的多端柔性直流输电系统控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1586-1592.
- XIONG Lingfei, HAN Minxiao. A novel combined control strategy for VSC-MTDC[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1586-1592.
- [19] BEERTEN J, COLE S, BELMANS R. Implementation aspects of a sequential AC/DC power flow computation algorithm for multi-terminal VSC HVDC systems[C] // Proceedings of 9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, Oct. 20-21, 2010, London, UK: 1-6.

收稿日期: 2017-04-27; 修回日期: 2017-07-18

作者简介:

赵国鹏(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用、电能质量控制等;

何彦良(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流输配电技术。E-mail: 15010956916@163.com

(编辑 姜新丽)