

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.10.005

海上风电经VSC-MTDC并网研究

于永生, 冯延晖, 江红鑫, 邱颖宁

(南京理工大学能源与动力工程学院, 南京 210094)

摘要:文中建立了风电场经两种拓扑结构的VSC-MTDC并入电网的模型,两种模型为串联模型和并联模型,并基于两种拓扑结构的比较结果对多端柔性直流输电控制器进行了优化。仿真模型主要包括:风电场等效聚合模型,风电场换流站控制器,直流电缆的Bergeron模型。优化方法采用单纯形算法。将两种拓扑结构的模型进行了仿真分析,仿真结果显示,在考虑到受交流系统扰动以及风电场侧切机情况下的稳定性,并联系统更加适合海上风电场经柔性直流输电并网。采用单纯形优化后的VSC-MTDC动态响应能力相对于优化改进前有了很大的提高。

关键词:多端直流输电;风电场;直流电缆;并联;串联;单纯形法;优化

Research on Offshore Wind Farm Integration Via VSC-MTDC

YU Yongsheng, FENG Yanhui, JIANG Hongxin, QIU Yingning

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: This paper builds two different models of offshore wind energy integration via VSC-MTDC, and compares the different dynamic reaction of the two different ways, and then optimizes the control parameters of the controller of VSC-MTDC adopting simplex method. The model used in emulation include: The VSC control model using a decoupled control strategy; The wind farm aggregate model and Bergeron model used in cable model. The simulation results show that it is better to use parallel connection when considering the fault in AC system and the shut-down of converter in offshore. The optimization can enhance the dynamic characters and improve the capability of keeping stability after disturbance.

Key words: VSC-MTDC; wind farm; DC cable; parallel connection; series connection; simplex method; optimization

0 引言

近年来,随着多种新能源发电方式的出现和对灵活的电力线路的需求,多端柔性直流输电(VSC-MTDC)的概念越来越受到国内外学者的关注^[1-2]。新能源发电输出功率变化很大,因此需要对送到交流电网的功率很强的控制能力。同时新能源发电需要和电网安全同步联结。鉴于较强的可控性,基于电

压源环流器的多端直流输电系统对于变化的风电场接入有着很大的潜力。它能实现风力发电与交流电网非同频异步联结,这一优点使得风力机能够运行在较大的风速变化区间。

文[3]中对多端VSC-HVDC(柔性直流输电)的3种拓扑结构在MATLAB环境下进行了仿真,但文章仅验证了3种拓扑结构的可行性,并没有考虑到系统受到扰动后的响应性能,也没有考虑到风电接入情况下系统的动态特性;文[4]中分析了采用并联结构的中国南澳多端直流输电工程,该工程采用并

收稿日期:2015-03-19; 修回日期:2015-04-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51505225);江苏省六大人才高峰项目(ZBZZ-045);江苏省自然科学基金面上项目(BK20131350);中央高校基本科研业务费专项资金资助(30915011324);留学回国人员择优资助项目。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51505225), Jiangsu Top Six Talent Summit Fund(ZBZZ-045), Jiangsu Province Natural Science Fund(BK 20131350), the Fundamental Research Funds for the Central Universities(30915011324), Returned Overseas Students Preferred Funding.

联拓扑的多端柔性直流输电将南澳岛上的风电并入陆上电网,是世界上第1个多端柔性直流输电工程,也是第1个采用多端柔性直流输电进行风电并网的工程,在中国的柔性直流输电工程领域具有划时代的意义;文[5]中分析了星型、环型、星型—中心环型等拓扑结构的优缺点,但文中仅从经济、技术方面进行了比较,并没有对系统的动态响应能力以及可行性进行比较;文[6]中研究了采用并联结构的南澳多端直流输电工程的控制方案,并对整个南澳多端直流输电系统进行了仿真研究,仿真结果显示,该并联系统对于系统的故障扰动具有较强的故障穿越能力;文[7]中提出一种新的采用传统晶闸管技术的四端柔性直流输电系统拓扑结构,将分布在不同地区的风电场进行并网,同时将 VSC-HVDC 和 LCC-HVDC 结合,设计了一种混合高压直流输电形式,融合了两者的优点;文[8]中指出一般在小功率抽头应用中才采用串联结构,因为此时的柔性直流输电系统可以运行在较高的电压和较低的电流,并联结构能为未来的扩展提供更多的灵活性;文[9]中对多端柔性直流输电控制器进行了优化,但文[9]中所采用控制器采用间接电流控制,而现在工程应用中多采用性能较好的直接电流控制;文[10]中比较了并联结构和串联结构的 VSC-MTDC 的区别,并将 CSC-HVDC 的主从控制策略应用到三端 VSC-MTDC 并联结构的控制器中;文[11]中从有功损耗、无功需求、经济性、故障恢复速度、潮流反转、系统扩展等方面对比采用传统晶闸管的串联型和并联型直流输电系统的优劣,认为并联型直流输电在实际工程应用中更具优势;文[12]中认为“与串联接线方式相比,并联接线方式直流输电的线路损耗较小,易于控制,进一步扩展的灵活性较高,具有相对最少的运行问题,因而在多数工程中被广泛接受”,但文[12]是基于传统晶闸管考虑的;文[13]中提出一种基于模块级联的背靠背柔性直流输电结构,仿真结果证实了所提出的系统模型的正确性和控制策略的有效性。

目前上述文献大都基于理论特性比较,少有文献对 VSC-MTDC 进行仿真比较。由于多端柔性直流输电应用于工程实际的案例较少,目前大多数的多端柔性直流输电的控制和运行方案大多数都借鉴传统的晶闸管电网换相多端直流输电的控制方案,而柔性直流输电和电网换相晶闸管高压直流输电在控制特性上又有很大的区别^[14]。类似于交流网络,因拓扑结构的不同,换流站间电流和电压的分配也将不同,因此不同拓扑结构的系统在启动、故障和扰动情况下的动态响应能力也不同。同时,不同拓

扑结构的多端柔性直流输电系统在工程造价和经济性上也有不同。同时,直流输电中换流站的增加必然引起控制系统的参数增加,这使得参数的选择和整定相对于两端系统有更高的要求,因此对于控制器的参数优化显得尤为重要。

VSC-MTDC 系统的拓扑结构可基本分为并联结构(见图 1)、串联结构(见图 2)以及混联结构 3 种类型^[1]。目前直流电网的发展处于初期阶段^[2],串联和并联系统的应用较受关注。并联系统在换流站的投入和切除方面有着较大的灵活性,但对于直流电缆的选择则需要考虑过电流的情况。串联系统能够将几个较低电压等级的换流站串联组合成较高等级的直流母线,但该种拓扑结构在换流站投入运行时需要配备较多的直流断路器来使得其中一些换流站的退出运行不影响其他换流站的运行,直流断路器的增加使得工程投资加大。现有文献对两种拓扑结构的对比分析鲜有涉及,文中即以这两种拓扑结构为主要研究内容,通过 PSCAD 仿真对两种拓扑的动态运行特性进行对比分析,为工程设计提供参考依据。

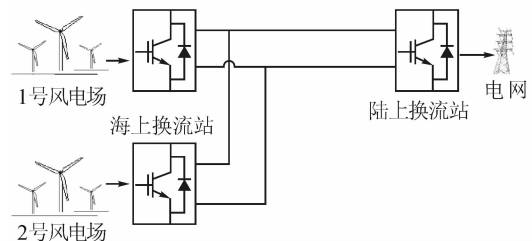


图 1 采用并联结构的多端柔性直流输电

Fig. 1 Diagram of parallel connection of VSC-MTDC

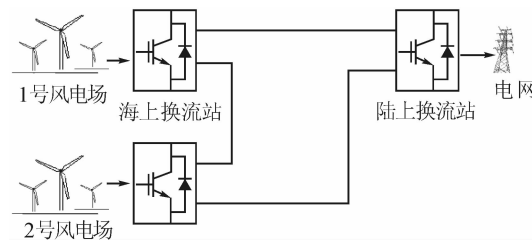


图 2 采用串联结构的多端柔性直流输电

Fig. 2 Diagram of series connection of VSC-MTDC

文中的结构如下:以海上风电场经多端直流输电并网为例,建立了图 1、2 两种不同拓扑结构的多端直流输电模型,采用前馈解耦控制策略^[15-16],设计了柔性直流输电换流站级控制。为了能够比较明晰地分析两种拓扑结构的动态响应能力,两种拓扑的多端直流输电系统的系统级控制均采用主从控制方式,该种控制方式也是中国第 1 个端直流输电系统南澳多端柔性直流输电系统采用的控制方式。为了稳定柔性直流输电直流侧电压,设定陆上换流站为主换流站,控制直流侧电压的稳定。文中研究了

风电场与柔性直流输电之间的相互作用,为了缩短仿真时间,风电场采用等效聚合模型。为了准确仿真柔性直流输电的动态特性,文中直流电缆采用 Bergeron 模型。同时,文中采用单纯形法对并联系统的控制器参数进行优化。

1 风电场模型

目前对于大型风电场通过柔性直流输电并网的研究主要包括风电场的等效模型,包括单机和多机,以及和其他新能源发电方式的联合运行控制研究^[17-19]。研究风力发电场的集群响应性能,例如风电并网、风能和其他类型的能源联合发电,由于大规模风电场中风力发电机数量众多(少则几十台,多则上百台),如果用发电机的全暂态模型表示风电场中的每台发电机,将每一台风力发电机都建立详细的模型无疑会增加系统模型的复杂度和运算速度,此类高阶模型占用的计算内存庞大,并且在数据准备及计算结果的分析方面难度增大。由于不需要考虑单独一台风力发电机组对电网的影响,采用单机聚合模型可以满足研究整个风电场对电网系统动态性能影响的需要。单机法的精度虽略低于多机法,但仍可以正确反应风场在并网点的动态性能,显著地减少了计算资源,节省计算时间,实用性高^[20]。风电场的聚合模型包含了聚合的机组、集电线路、变压器等电器元件,以及等效风速。

此处采用文[17]、[19]中所提出的单机聚合模型方法,将一个 1 000 MW 风电场等效成相同容量的直驱永磁风力发电机,风速模型采用四分量模型:

$$v_w = v_{wM} + v_{wG} + v_{wR} + v_{wN} \quad (1)$$

式(1)中: v_{wM} 为基本风; v_{wG} 为阵风; v_{wR} 为渐变风; v_{wN} 为噪声。

v_{wM} 取决于 Weibull 分布:

$$v_{wM} = A \cdot I \left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2)$$

A 和 k 为 Weibull 分布的尺度参数和形状参数。

v_{wG} 描述风速突然变化的特性:

$$v_{wG} = \begin{cases} 0 & t < T_{IG} \\ V_s & T_{IG} < t < T_{IG} + T_G \\ 0 & t > T_{IG} + T_G \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $V_s = (G_{\max}/2) \{1 - \cos[2\pi(t/T_G) - (T_{IG}/T_G)]\}$; T_{IG} 为启动时间; T_G 为周期; $G_{\max}$ 为风速最大值。

v_{wR} 描述风电场风速的渐变特性:

$$v_{wR} = \begin{cases} 0 & t < T_{1R} \\ V_r & T_{1R} < t < T_{2R} \\ R_{\max} & T_{2R} < t < T_R + T_{2R} \\ 0 & t > T_R + T_{2R} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: $V_r = R_{\max}[1 - (t - T_{2R})/(T_{1R} - T_{2R})]$; $R_{\max}$ 为最大值, m/s; T_{1R} 为启动时间, s; T_{2R} 为终止时间, s; T_R 为保持时间, s。

v_{wN} 表征风速无规律随机变化:

$$\begin{cases} v_{wN} = 2 \sum_{i=1}^n [S_v(\omega_i) \cdot \Delta\omega]^{1/2} \cos(\omega_i + \varphi_i) \\ \omega_i = \left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta\omega \\ S_v(\omega_i) = \frac{2K_N F^2 |\omega_i|}{\pi^2 \{1 + [F\omega_i/(\mu\pi)]^2\}^{4/3}} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: φ_i 为 $0 \sim 2\pi$ 之间均匀分布的随机变量; K_N 为地面粗糙系数; F 为扰动范围, m²; N 为频谱取样点数; ω_i 为各个频率段的频率; μ 为相对高度的平均风速。

风力机模型为

$$\begin{cases} P_w = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) A_R v_w^3 \\ C_p(\lambda, \beta) = 0.5(\gamma - 0.022\beta^2 - 5.6)e^{-0.17\gamma} \\ \gamma = 2.237\lambda \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: P_w 为风轮从风中捕获的风能; ρ 为空气密度, kg/m³; C_p 为风力机的风能转换效率系数; A_R 为风轮扫过的面积; v_w 为风速, m/s; λ 为叶尖速比; β 为叶片桨距角, (°)。

考虑到风电场需要能够反映风电场风机出力变化对风电场输出功率的影响,文中用一台大容量风力发电机来代表整个风电场的出力状况^[17]。该等值机组在等效风速作用下所产生的风电功率与所有机组输出功率相等。风力发电机采用直驱型永磁同步发电机(PMSG)。

2 柔性直流输电模型

2.1 换流站数学模型及其控制

目前工程上投入应用较多的柔性直流输电(VSC-HVDC)主要采用三相两电平结构^[15],见图3。

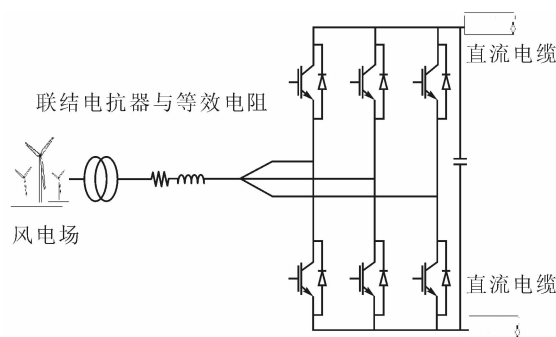


图3 柔性直流输电换流站模型

Fig. 3 Structure of VSC-HVDC

由 Kirchhoff 定律, 可得暂态方程

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = U_{sa} - U_{ca} \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = U_{sb} - U_{cb} \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = U_{sc} - U_{cc} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: i_a, i_b, i_c 为三相电流; U_{sa}, U_{sb}, U_{sc} 为风电场变压器二次侧三相电压; U_{ca}, U_{cb}, U_{cc} 为变流器交流侧基波三相电压; R 和 L 为等效电阻和电感。式(7)经过 dq 变换后为

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} + Ri_d = U_{sd} - U_{cd} + \omega Li_q \\ L \frac{di_q}{dt} + Ri_q = U_{sq} - U_{cq} + \omega Li_d \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: U_{sd} 和 U_{sq} 为电网侧三相电压在旋转坐标系中的向量; U_{cd} 和 U_{cq} 为变流器三相电压在旋转坐标系中的向量。

直流侧动态方程为

$$C \frac{dU_r}{dt} = i_r - i_l \quad (9)$$

式(9)中: i_r 为电容和变流器之间直流线路的电流; i_l 为电容右侧直流线路的电流; U_r 为直流电压。式(9)描述了直流电容流入流出电流与电容电压的关系。

根据瞬时无功功率理论, abc 三相静止坐标系下换流站与交流系统交换的有功功率 p_s 和无功功率 q_s 为

$$\begin{cases} p_s = u_{sa} i_a + u_{sb} i_b + u_{sc} i_c \\ q_s = [(u_{sa} - u_{sb})i_c + (u_{sb} - u_{sc})i_a + (u_{sc} - u_{sa})i_b] / \sqrt{3} \end{cases} \quad (10)$$

经过 dq 变换, 在旋转坐标系中, 风电场输出的有功功率 p_s 和无功功率 q_s 为

$$\begin{cases} p_s = \frac{3}{2} (U_{sd} i_d + U_{sq} i_q) \\ q_s = \frac{3}{2} (U_{sd} i_q - U_{sq} i_d) \end{cases} \quad (11)$$

当 d 轴以电网电压向量定位时, 即 $U_{sq} = 0$, 则式(11)变为

$$\begin{cases} p_s = \frac{3}{2} U_{sd} i_d \\ q_s = \frac{3}{2} U_{sd} i_q \end{cases} \quad (12)$$

在式(12)中, 分别控制 i_d 和 i_q 可以调节换流站与交流系统交换的有功和无功功率。

对于直接电流控制, 令:

$$\begin{cases} e_{ur} = u_{ref} - u_r \\ e_{il} = i_l - \hat{i}_l \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中, $\hat{i}_l$ 为负载的给定电流。根据李雅普诺夫

夫函数, 选取李雅普诺夫候选标量函数为电容储能波动和交流侧注入的能量波动之和, 即为

$$V_L = \frac{1}{2} C_r (u_{ref} - u_r)^2 + \frac{1}{2} R_e (i_l - \hat{i}_l)^2 = \frac{1}{2} C_r e_{ur}^2 + \frac{1}{2} R_e e_{il}^2 \quad (14)$$

又有

$$\begin{aligned} \dot{V}_L &= C_r e_{ur} \dot{e}_{ur} + R_e e_{il} \dot{e}_{il} = \\ e_{ur} [C_r \frac{du_{ref}}{dt} - (i_r - i_l)] &+ R_e e_{il} (\frac{di_l}{dt} - \frac{d\hat{i}_l}{dt}) = \\ e_{ur} (C_r \frac{du_{ref}}{dt} - i_r + i_l) &+ R_e e_{il} (\frac{1}{R_e} e_{ur} - \frac{d\hat{i}_l}{dt}) \end{aligned} \quad (15)$$

当标量函数 $\dot{V}_L < 0$ 时, 系统处在稳定平衡点, u_r 能够跟踪 u_{ref} , 因此可以得出控制式:

$$\begin{cases} C_r \frac{du_{ref}}{dt} - i_r + \hat{i}_l = -k_{\eta} e_{ur} \\ \hat{i}_l = \frac{1}{R_e} \int e_{ur} dt \end{cases} \quad (16)$$

即

$$\begin{aligned} i_{ref} &= C_r \frac{du_{ref}}{dt} + \frac{1}{R_e} \int e_{ur} dt + k_{\eta} e_{ur} = \\ C_r \frac{du_{ref}}{dt} + k_{\eta} \int e_{ur} dt &+ k_{\eta} e_{ur} \end{aligned} \quad (17)$$

在大多数情况下, $\dot{u}_{ref} = 0$, 即可得到直流电压 PI 控制器, 同理可以推导出其他控制量的控制器。

采用前馈解耦控制, 可以得到电网侧换流站的电流内环控制和风电场侧换流站的电流内环控制, 见图 4.5。为了减小风电场侧换流站输出波动, 风电场侧换流站采用改进的电流内环控制。

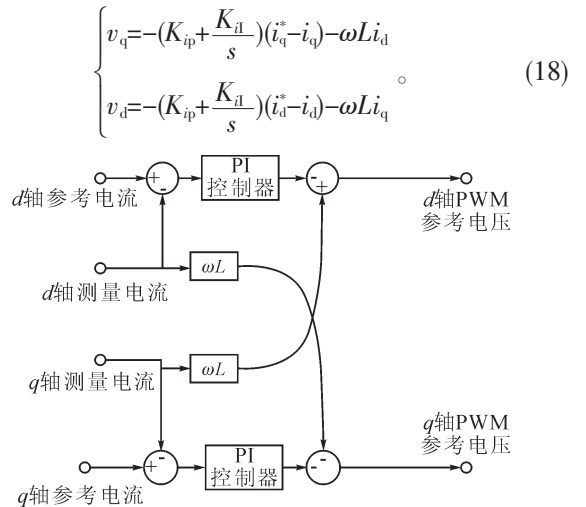


图 4 风电场侧电流内环控制

Fig. 4 Inner current control of WF-VSC

内环电流控制的传递函数为:

$$F(s) = (k_p + k_i s) \frac{K_{PWM}}{1 + \frac{1}{2} T_s s} \cdot \frac{1}{1 + T_s s} \cdot \frac{1}{R + s \frac{X_L}{\omega}} \quad (19)$$

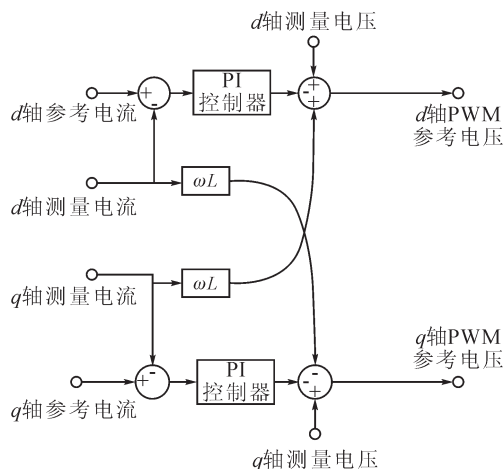


图5 电网侧电流内环控制

Fig. 5 Inner current control of GS-VSC

式(19)中: $(k_p+k_i s)$ 为比例积分环节; $1/(R+sX_L/\omega)$ 为等效电感和电阻的传递函数; $K_{\text{PWM}}[1+(1/2)T_s s]$ 为变流器的函数; K_{PWM} 为 PWM 的等效增益, $K_{\text{PWM}}=U_{\text{dc}}/2u_{\text{rms}}$, u_{rms} 为交流线电压有效值; $1/(1+T_s s)$ 为采样滤波环节。

文中所采用模型通过外环控制来区别不同换流站的功率和电压。在连接有风电场的多端系统中,由于风电场无法提供一个稳定的电压,所以风电并网前,需要大电网先并入网络给柔性直流输电系统提供一个稳定的直流电压,然后风电场才能并入网络,否则容易引起风电场输出的波动^[7]。

外环电压控制器见图6。

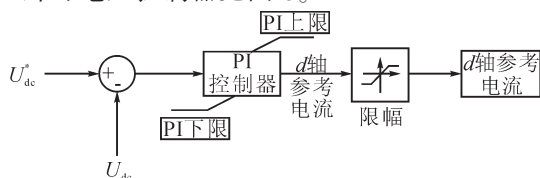


图6 外环电压控制器

Fig. 6 Outer voltage control

外环电压控制的传递函数为:

$$F(s)=(k_p+k_i s)\frac{1}{3T_s s+1}\cdot\frac{u_{\text{sq}}}{U_{\text{dc}}}\cdot\frac{1}{sC}\cdot\frac{1}{T_s s+1} \quad (20)$$

式(20)中: $(k_p+k_i s)$ 为比例积分环节; $1/(1+T_s s)$ 为采样滤波环节; u_{sq} 为交流侧三相电压经 dq 变换得到的 q 轴电压; U_{dc} 为直流电压; C 为直流侧电容; $1/(1+3T_s s)$ 为电流内环的等效传递函数。

外环有功、无功控制器见图7、8。

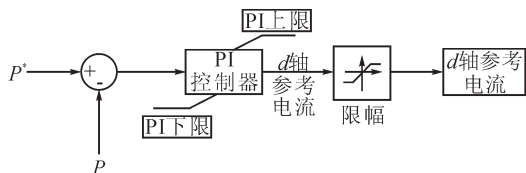


图7 外环有功控制器

Fig. 7 Outer active power control

外环有功和无功的传递函数为

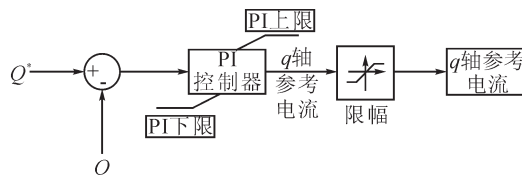


图8 外环无功控制器

Fig. 8 Outer reactive power control

$$F(s)=(k_p+k_i s)\frac{1}{3T_s s+1}\cdot\frac{3}{2}u_{\text{sq}}\cdot\frac{1}{T_s s+1} \quad (21)$$

式(21)中: $(k_p+k_i s)$ 为比例积分环节; $1/(1+T_s s)$ 为采样滤波环节; u_{sq} 为交流侧三相电压经 dq 变换得到的 q 轴电压; $1/(1+3T_s s)$ 为电流内环的等效传递函数。

2.2 电缆线路模型

电缆线路暂态模型见图9。

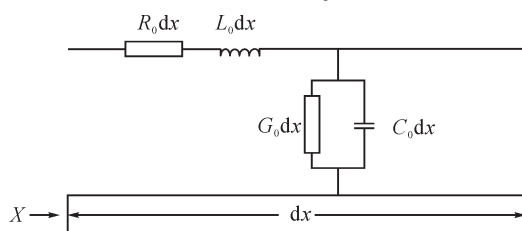


图9 电缆线路的分布模型

Fig. 9 Distributed cable modular component model

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x}=R_0 i+L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x}=G_0 u+C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad (22)$$

式(22)为电缆线路的微分方程组。由于该方程组在电缆线路中很难找到解析解。在含有多导体的同轴电缆中,这个模型会更加复杂。因此,大多数情况下主要采用行波模型。行波模型见式(23), ω 为输电线传输正弦波角频率, x 和 t 分别为传播距离和时间。

$$\begin{cases} u(x,t)=\text{Im}\{\sqrt{2}U(x)e^{j\omega t}\} \\ i(x,t)=\text{Im}\{\sqrt{2}I(x)e^{j\omega t}\} \end{cases} \quad (23)$$

省略对时间的导数,可以得到仅关于距离 x 的微分方程组:

$$\begin{cases} -\frac{dU}{dx}=(R_0+j\omega L_0)I=Z_0 I \\ -\frac{dI}{dx}=(G_0+j\omega C_0)U=Y_0 U \end{cases} \quad (24)$$

令 $Z_0=R_0+j\omega L_0$, $Y_0=G_0+j\omega C_0$ 。对于含多导体的同轴电缆来说:

$$\begin{cases} \frac{d^2 U}{dx^2}=Z_0 Y_0 U \\ \frac{d^2 I}{dx^2}=Z_0 Y_0 I \end{cases} \quad (25)$$

定义传播系数和特征阻抗分别为 $\gamma=\alpha+j\beta=\sqrt{Z_0 Y_0}=\sqrt{(R_0+j\omega L_0)(G_0+j\omega C_0)}$ 和 $Z_c=\sqrt{Z_0/Y_0}$:

$$\begin{cases} \frac{d^2 U}{dx^2} = \gamma^2 U \\ \frac{d^2 I}{dx^2} = \gamma^2 I \end{cases} \quad (26)$$

该方程的通解即为行波模型:

$$\begin{cases} U = A_1 e^{-\gamma x} + A_2 e^{\gamma x} \\ I = B_1 e^{-\gamma x} + B_2 e^{\gamma x} \end{cases} \quad (27)$$

由于直流线路不同于交流线路, 直流线路没有基波频率 ω , 所以为了降低模型的复杂度, 电缆线路模型采用 Bergeron 模型, Bergeron 模型基于行波理论, Bergeron 是一连串 π 形等效电路, 该模型能够准确反映电缆线路的电感和电容的分布特性。Bergeron 模型的电阻参数基于半集总模型, 电阻值有 50% 集中在电缆中心点, 另外两端各占 25% 的阻值。电缆线路数据见表 1。

表 1 电缆线路数据

Table 1 Parameters of cables

参数	数值
电阻 $r/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.07
电感 $l/(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	0.50
额定电压/kV	520.00
电缆长度/km	15.00
线路电容/mF	10.00

3 单纯形法

一个线性规划问题存在几个决策变量, 那么这个问题的每一个约束条件就可以以决策变量的个数为维数的一个半空间来描述。单纯形就是线性规划问题的所有约束条件所确定的所有半空间的交集所形成的一个可行区域, 如 0 维中的点, 一维中的线段, $\dots, m-1$ 维中的 m 个顶点的多面体^[21]。

假设搜索空间中有 m 个点, 每个点包括 d 个分量, 记 $X=[x_1, x_2, \dots, x_d]$, 其中 $m=d+1$ 。将 m 个顶点按照其对应的目标函数值从小到大排序(优劣排序), 第 i 个顶点记作 $X_{m,i}$, m 个顶点的单纯形 S_m 表示为: $S_m = \{X_{m,1}, X_{m,2}, \dots, X_{m,m}\}$ 。单纯形 S_m 的最差顶点记为 $X_{m,w}$, $X_{m,w}=X_{m,m}$, 最好顶点记作 $X_{m,b}$, $X_{m,b}=X_{m,1}$, 除最差顶点 $X_{m,w}$ 之外的其他所有顶点的形心记作 $X_{m,c}$, 除第 i 个顶点 $X_{m,i}$ 之外的其他所有顶点的形心记作 $X_{m,i}^c$ 。

由于目标函数是个具有凸性的超平面, 故它的一个最优值(若存在的话)必在单纯形的某个顶点上得到。

单纯形法的搜索步骤为:

1) 给定初始顶点 $X'_{m,0}=[x_{0,1}, x_{0,2}, \dots, x_{0,m-1}]$

则单纯形其他初始顶点为

$$\begin{cases} X'_{m,1}=[x_{0,1}+\varepsilon_1, x_{0,2}, \dots, x_{0,m-1}] \\ \vdots \\ X'_{m,i}=[x_{0,1}, x_{0,2}, \dots, x_{0,i}+\varepsilon_i, \dots, x_{0,m-1}], \varepsilon_i > 0, i=1, 2, \dots, m \\ \vdots \\ X'_{m,m}=[x_{0,1}, x_{0,2}, \dots, x_{0,m}+\varepsilon] \end{cases}$$

2) 计算各顶点的目标函数, 根据目标函数值从小到大顺序排序(优劣顺序), 排序后各顶点依次为 $X_{m,1}, X_{m,2}, \dots, X_{m,m}$; 确定最好顶点 $X_{m,b}$, 最差顶点 $X_{m,w}$, 计算形心 $X_{m,c}$, 设置一次成功搜索标志变量 $\text{Flag}=\text{F}$ 。

3) 单纯形搜索

① $X^*=X_{m,w}$; $\text{Flag}=\text{F}$;

② 计算反射点

$X_{m,w}^r = X_{m,w}^r + \gamma_r (X_{m,w}^c - X_{m,w})$, $0 < \gamma_r < 1$ 及其对应的目标函数之 $f(X_{m,w}^r)$;

③ 如果 $f(X_{m,w}^r) < f(X_{m,b})$, 则计算扩张点

$X_{m,w}^e = X_{m,w}^r + \gamma_e (X_{m,w}^r - X_{m,w}^c)$, $0 < \gamma_e \leq 1$ 及其目标函数值 $f(X_{m,w}^e)$;

如果 $f(X_{m,w}^e) < f(X_{m,b})$, 则 $X^*=X_{m,w}^e$, $\text{Flag}=\text{T}$; 否则 $X^*=X_{m,w}^r$;

④ 如果 $f(X_{m,w}^r) < f(X_{m,m-1})$, 则 $X^*=X_{m,w}^r$, $\text{Flag}=\text{T}$;

⑤ 如果 $f(X_{m,m-1}) < f(X_{m,w}^r) < f(X_{m,m})$,

则计算内压缩点

$X_{m,w}^{ic} = X_{m,w}^c + \gamma_{ic} (X_{m,w}^c - X_{m,w})$, $0 < \gamma_{ic} < 1$ 及其目标函数值 $f(X_{m,w}^{ic})$;

如果 $f(X_{m,w}^{ic}) < f(X_{m,m})$, 则 $X^*=X_{m,w}^{ic}$, $\text{Flag}=\text{T}$; 否则 $X^*=X_{m,w}^r$;

⑥ 如果 $f(X_{m,w}^r) > f(X_{m,m})$,

则计算外部压缩点 $X_{m,w}^{oc} = X_{m,w}^c + \gamma_{oc} (X_{m,w}^c - X_{m,w})$, $0 < \gamma_{oc} < 1$ 及其目标函数值 $f(X_{m,w}^{oc})$; 如果

$f(X_{m,w}^{oc}) < f(X_{m,m})$, 则 $X^*=X_{m,w}^{oc}$, $\text{Flag}=\text{T}$;

⑦ 返回计算结果 Flag 和 X^* 。

4) 如果 $(\text{Flag}=\text{T})\{X_{m,w}=X^*$; 返回 2) $\}$

否则:

① 单纯性各顶点以最好顶点 $X_{m,b}$ 为中心进行整体压缩, 即

$X_{m,i} = X_{m,b} + \gamma_s (X_{m,i} - X_{m,b})$, $0 < \gamma_s < 1, i=2, \dots, m$ 。

② 返回 2)。

4 仿真结果

4.1 两种拓扑结构并网响应的比较

文中采用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 对图 1、2 两种不同拓扑结构的风电并网方式进行仿真, 两个风电场容量分别为 150 MW。将两个风电场并联或串联接入多端直流输电系统, 多端柔性直流输电逆变侧直流额定电压为 520 kV。即并联系统风电

场侧换流站直流母线电压为 520 kV, 串联系统风电场侧换流站出口直流电压为 260 kV, 直流母线电压为 520 kV。启动时整流侧有功、无功功率见图 10、11。

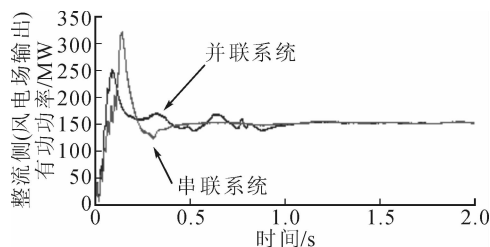


图 10 启动时整流侧有功功率

Fig. 10 Active power in rectifier when starts

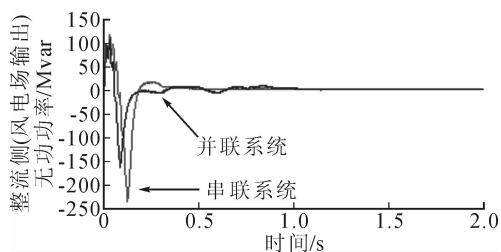


图 11 启动时整流侧无功功率

Fig. 11 Reactive power in rectifier when starts

如图 10、11, 对于风电场侧换流站有功功率, 串联系统的超调量为 113.3%, 并联系统的超调量为 63.3%, 并联系统在超调量远小于串联系统。对于风电场侧换流站的无功功率, 并联系统也比串联系统要小很多。由于海上电网由很多台风电机组成, 且机组的参数可能不同, 因此超调量的减小对于增加海上风电场的交流电网的稳定具有十分重要的意义。

对于故障的响应比较, 对于上述模型, 在 2.5 s 电网公共连接点(PCC)侧引入一个三相接地故障, 故障持续时间 0.05 s。故障响应波形见图 12。

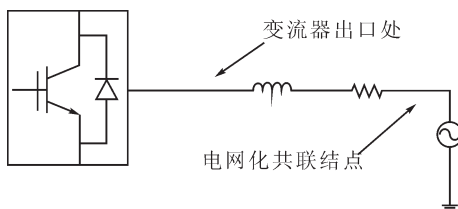


图 12 交流故障点设置

Fig. 12 Set point of fault

故障情况下直流电压的波动见图 13。由于逆变侧换流站控制柔性直流输电系统的直流电压, 因此当逆变侧发生故障时, 电网无法给予柔性直流电压直流支撑, 所以直流电压会立即下跌。同时, 故障切除后的振荡过程中, 并联系统的超调量要小于串联系统的超调量。

对于含有多个风电场并网的 VSC-MTDC 系统, 还需要考虑当某个风电场发生故障而导致该风电场

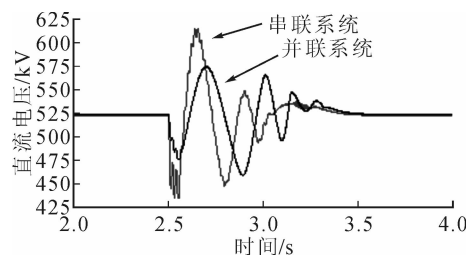


图 13 故障下直流电压的波动

Fig. 13 Fluctuation of DC voltage during fault

换流站闭锁, 使得该风电场停运。这对于 VSC-MTDC 来说会有很大的扰动。因此对 2 号风电场脱网后系统的响应情况进行了仿真分析, 见图 14。2 号风电场发生故障时变流器闭锁, 脱离多端直流系统, 此时三段系统变为两端系统, 串联系统需要经过断路器将该换流站旁路, 而并联系统则不需要直流旁路断路器。

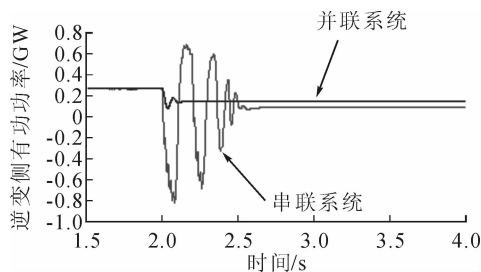


图 14 2 号风电场脱网后逆变器有功功率

Fig. 14 Active Power in inverter after No.2 WF-VSC shut off

当风电场侧某个变流器脱网后, 串联系统中剩余的换流站需要重新建立新的直流电压平衡, 此时将会引起有功功率的大幅振荡, 而并联系统由于两个风电场的变流器是工作在并联的母线上, 两个变流器之间的电压互不影响, 所以在某一个换流站退出运行后系统不会有较大的波动, 见图 15。

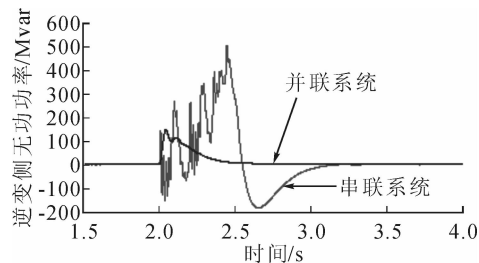


图 15 2 号风电场脱网后逆变器无功功率

Fig. 15 Reactive power in inverter after No.2 WF-VSC shut off

并联系统中的 2 号风电场侧变流器退出不会影响 1 号风电场的输出功率, 而串联系统中则会有影响, 这是因为串联系统中某一个换流站的退出是该换流站被断路器旁路, 从而使得另外的换流站直流侧电压升高, 而直流电压是柔性直流输电中的关键环节, 直流电压的不稳定会引起风电场输出功率的

波动, 见图 16、17。

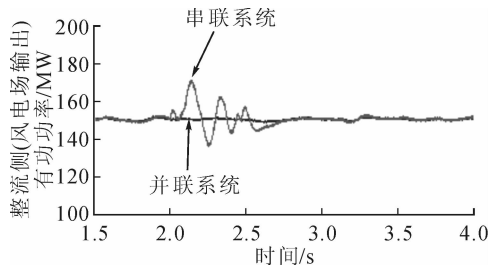


图 16 2号风电场脱网后,1号风电场有功功率

Fig. 16 Active power in No.1 WF-VSC after No.2 WF-VSC shut off

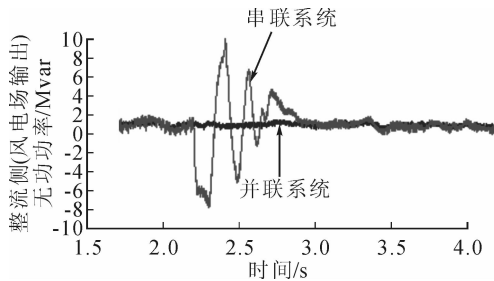


图 17 2号风电场脱网后,1号风电场无功功率

Fig. 17 Reactive power in No.1 WF-VSC after No.2 WF-VSC shut off

4.2 单纯形优化结果

风电场的风速采用风力机额定风速 13 m/s, 风力发电机数量 200 个, 用 1 号和 2 号来表示两个海上风电场, 每个风电场含 100 台风机, 风电场额定功率 300 MW, 直流侧额定电压 520 kV, VSC-MTDC 拓扑结构采用图 1 所示并联结构, 选取逆变侧为主站, 控制直流侧的额定电压。

在优化算法中, 风电场侧换流站的优化控制目标为有功功率; 电网侧换流站的控制目标为多端直流母线电压和有功功率。

由 ITAE (integrated time and absolute error)^[22]最小化准则, 文中设置优化系统的目标函数为:

$$O_f(X) = \int_0^T t |e_{P_{rec}}| dt + \int_0^T t |e_{U_{dc}}| dt + \int_0^T t |e_{P_{inv}}| dt. \quad (28)$$

式(28)中: $e_{P_{rec}}$ 为海上换流站(整流侧)有功功率给定值与测量值之间的差值; $e_{P_{inv}}$ 陆上换流站(逆变侧)有功功率给定值与测量值之间的差值; $e_{U_{dc}}$ 为直流侧电压给定值与测量值之间的差值。优化结果见图 18–25。

逆变侧有功功率开始时的负值是换流站向直流侧电容充电过程。由图 19 可知改进后逆变侧换流站有功的振荡次数和超调量都有所减小, 由于逆变侧换流站控制直流电压, 从而使得直流侧电压的振荡次数减小, 见图 21。由图 20 可看出, 经优化算法改进后, 整流侧功率的超调量有明显减小。

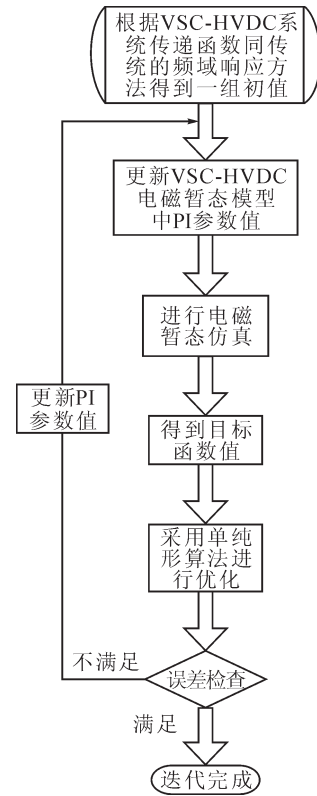


图 18 优化过程流程图

Fig. 18 Flowchart of the simplex method

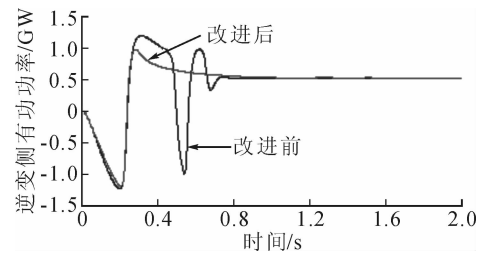


图 19 逆变侧有功功率

Fig. 19 Active power in inverter

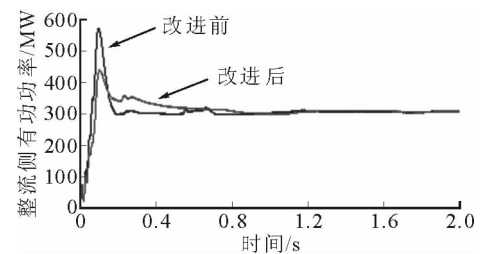


图 20 整流侧有功功率

Fig. 20 Active power in rectifier of optimization

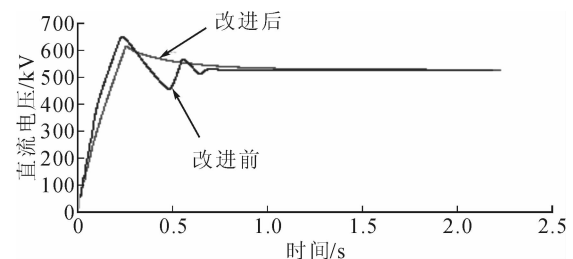


图 21 直流电压

Fig. 21 DC voltage of optimization

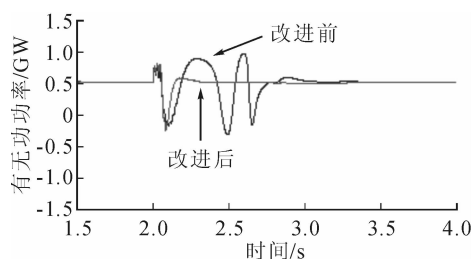


图 22 故障下逆变器有功功率

Fig. 22 Active power in inverter

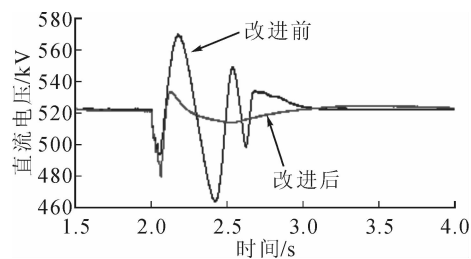


图 23 故障下直流侧电压

Fig. 23 DC voltage after fault

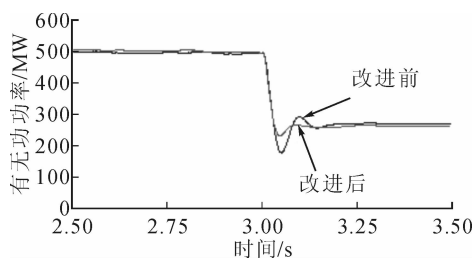


图 24 2号风电场脱网后逆变器有功波形

Fig. 24 Inverter active power after No.2 wind farm shut-down

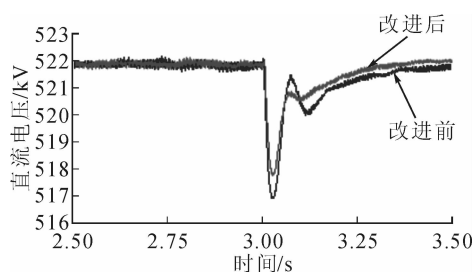


图 25 2号风电场脱网后直流电压

Fig. 25 DC voltage after No.2 wind farm shut-down

为了测试优化方法对于系统的鲁棒性和故障恢复能力,仿真 2.0 s 时在系统的交流侧设置一个三相接地短路故障,故障持续时间 0.05 s。

由图 22、23 可知,改进后的系统在发生故障后,系统振荡的次数明显减小。系统的有功功率振荡时间由原来的 1.09 s 减小到 0.32 s,而直流电压的最大超调量由原来的 11.2%降低到 4.8%,因此优化后的控制器能够有效降低故障引起的系统波动及振荡,且响应时间大幅减小。2 号风电场在 $t=3$ s 时脱网,2 号风电场换流站闭锁,输出降至零。由图 24 可

看出当两个风电场中有一个风电场停机后,系统能够很快进入新的稳定运行点并保持稳定运行。改进后的系统能够更快恢复到稳定,且波动次数减少和波动偏差减小,最大超调量减小了 8%。由图 25 可以看出 2 号风电场在脱网后,直流电压能够以更快的速度恢复到初始值,且最大超调量减小了 0.2%。

为了模拟系统的功率穿越能力,文中在 $t=3$ s 时在受端系统交流侧设置一个电压跌落,电压由 1.0 p.u. 跌落至 0.5 p.u.。系统响应曲线见图 26。改进有的系统超调量见减小了 2.5%,且改进后的系统能够在受端交流系统跌落后恢复到初始运行能力,恢复时间相对于优化前减小,即改进后的系统在故障穿越过程中的稳态误差相对较小,且具有更快的响应速度。

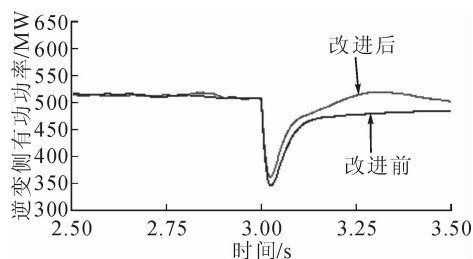


图 26 故障穿越波形

Fig. 26 Capability of fault ride through

5 结语

文中建立了风电场的聚合模型以及两种拓扑结构的多端柔性直流输电模型,并采用单纯形算法对并联系统的控制器进行了优化,由仿真结果可知:

1)在系统受到扰动时,并联系统相对于串联系统具有较小的波动,体现在较小的超调量和较少的振荡次数中,并联系统中的整流侧某一端(风电场侧某一个换流站)因故障脱网时,能够较快恢复到新的稳定运行点,具有较小的功率波动,这样会减小保护装置的误动作,因此并联系统具有较高的运行灵活性。综合风电场的运行特性以及风电场的功率波动性,由于并联系统受两侧交流系统的故障及功率波动影响较小,从系统稳定性来考虑,并联系统更加适用于风电场经多端柔性直流输电并网。

2)多端直流输电换流站个数增加,控制器参数调节变得更加复杂,单纯形法能够对风电场 VSC-MTDC 并网非线性复杂系统控制器的多个参数多个变量进行优化,且仿真结果显示优化效果较好,优化后的参数有利于系统快速达到稳态并能提高系统的鲁棒性。

3)从经济性方面考虑,串联系统中,为了防止某一个风电场因故障而脱网影响整体系统的正常运行,每一个换流站需要额外配置一个直流断路器,这将增加工程中的经济投入。由于串联系统经过串联

后每个换流站所分担的电压小于并联的换流站, 电压等级的降低使得电容的投资将减少。

参考文献:

- [1] 赵成勇. 柔性直流输电建模和仿真技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [2] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [3] 梁海峰. 柔性直流输电系统控制策略研究及其实验系统的实现[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
LIANG Haifeng. The research on control strategy of VSC-HVDC and its experimental system realization[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [4] LI Xiaolin, YUAN Zhichang, FU Jiao, et al. Nanao multi-terminal VSC-HVDC project for integrating large-scale wind generation[C]//2014 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Washington DC, United States; IEEE, 2014: 1-5.
- [5] 孙文博. 多端柔性直流输电系统控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [6] FU Jiao, YUAN Zhichang, WANG Yizhen, et al. Control strategy of system coordination in Nanao multi-terminal VSC-HVDC project for wind integration[C]//2014 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Washington DC, United States; IEEE, 2014: 1-5.
- [7] 陈霞. 基于多端直流输电的风电并网技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [8] 陈谦. 新型多端直流输电系统的运行与控制[D]. 南京: 东南大学, 2004.
- [9] 王松, 李庚银, 周明. VSC-MTDC 控制系统的参数优化及柔性调整策略[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 380-386.
WANG Song, LI Gengyin, ZHOU Ming. Parameter optimization and soft regulation strategy of VSC-MTDC control system[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 380-386.
- [10] 梁盟. 柔性多端直流输电系统的控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
LIANG Meng. Research on control of VSC-MTDC[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [11] 胡永瑞. 多端直流输电系统若干问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
HU Yongrui. Research on several issues in MTDC transmission system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [12] 袁旭峰, 程时杰. 多端直流输电技术及其发展[J]. 继电器, 2006, 24(19): 61-67.
YUAN Xufeng, CHENG Shijie. Multi-terminal HVDC transmission technology and its development[J]. Relay, 2006, 24(19): 61-67.
- [13] 周国梁, 石新春. 一种新型拓扑的背靠背柔性直流输电系统及其仿真[J]. 高压电器, 2008, 44(2): 104-109.
ZHOU Guoliang, SHI Xinchun. A novel HVDC-flexible system and its simulation[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(2): 104-109.
- [14] 陈树勇, 徐林岩, 孙栩, 等. 基于多端柔性直流输电的风电并网控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(S1): 32-38.
CHEN Shuyong, XU Linyan, SUN Xu, et al. The control of wind power integration based on multi-terminal high voltage DC transmission with voltage source converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S1): 32-38.
- [15] 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.
- [16] 张兴, 张崇巍. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [17] 李环平, 杨金明. 基于 PSCAD-EMTDC 的大型并网风电场建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 62-66.
LI Huanping, YANG Jinming. Model and simulation of large grid connected wind farm based on PSCAD-EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 62-66.
- [18] CONROY J, WATSON R. Aggregate modelling of wind farms containing full-converter wind turbine generators with permanent magnet synchronous machines-transient stability studies[J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(1): 39-52.
- [19] 夏珧, 李征, 蔡旭, 等. 基于直驱式永磁同步发电机组的风电场动态建模[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1439-1445.
XIA Yue, LI Zheng, CAI Xu, et al. Dynamic modeling of wind farm composed of direct-driven permanent magnet synchronous generators[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1439-1445.
- [20] 杨勇波, 江波, 杨华云, 等. 风电场动态等值及其在暂态稳定分析中的应用[J]. 中国电力, 2011, 44(7): 66-70.
YANG Yongbo, JIANG Bo, YANG Huayun, et al. Dynamic equivalence of wind farms and its application to power system transient stability analysis[J]. Electric Power, 2011, 44(7): 66-70.
- [21] 肖宏峰. 基于单纯形多向搜索的大规模进化优化算法[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
XIAO Hongfeng. Large scale evolution optimization algorithm based on simplex multi-direction search[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [22] 项国波. ITAE 最佳控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- 于永生(1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流输电、大规模风电并网。
- 冯延晖(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为可再生能源发电、电力电子与电力传动、新能源并网控制(通信作者)。