

特高压直流输电工程 换流单元在线投入控制策略的选择

穆清, 王明新, 曾南超, 蒋卫平, 王华伟
(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Selection of Control Strategy for On-Line Deblocking of Converter Units Used in UHVDC Power Transmission Project

MU Qing, WANG Mingxin, ZENG Nanchao, JIANG Weiping, WANG Huawei
(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: During the process of on-line blocking and de-blocking of converter units used in ultra high voltage direct current(UHVDC) power transmission project, the control strategy greatly impacts on transient response characteristics of UHVDC power transmission. To remedy the phenomena that transient characteristics that does not conform to the requirement appear during the on-line de-blocking of converter units, such as to high overshoot, to long transient duration and so on, two different control strategies are proposed. Firstly, by use of a new model identification method the nonlinear converter unit is changed into a single-input and single-output model; secondly, the typical controller for the rectifier is simplified to a discrete PI regulator; finally, by means of connecting the single-input and single-output model with the discrete PI regulator to obtain an overall model for the simulation and parameter optimization of the controller, and by use a brand new method the parameters of the controller are optimized to improve the transient characteristics of the overall converter unit. The control principle and parameters of the controller are slightly adjusted on the EMTDC platform, thus an appropriate control strategy is achieved and the correctness of the proposed procedures for the overall simulation is proved.

KEY WORDS: ultra high voltage direct current(UHVDC) power transmission; on-line deblocking of converter units; control strategy; parameter optimization

摘要: 特高压直流输电系统换流单元在线投退过程中, 控制方法对特高压直流输电的暂态响应特性影响很大。为了克服传统直流控制器在换流单元在线投入过程中出现暂态特性不符合要求的现象, 如超调量过大、过渡时间过长等, 提出了 2 种不同的控制策略。首先, 使用一种新的模型辨识法把换流单元转变成一个单输入单输出模型; 其次, 把传统整流站的控制器离散化; 最后将单输入单输出模型和离散的控制模型连接起来, 得到一个整体的换流器仿真和参数优化的

模型, 并使用一种全新的参数优化的方法, 改善了整体换流单元模型的暂态特性。通过在 EMTDC 环境下对参数适当调整, 得到了合适的控制方案, 同时也证明了整个仿真步骤的正确性。

关键词: 特高压直流输电; 换流单元在线投入; 控制策略; 参数优化

0 引言

向家坝—上海奉贤特高压直流输电工程(简称向上直流工程)于 2010 年投运, 其电压等级为 ± 800 kV、传输功率为 6 400 MW、传输距离为 1 915 km, 是目前世界上输送功率最大的双极直流输电系统。其电能损耗是相同条件下传统直流输电的 1/3, 为西电东送提供了强有力的支撑。特高压直流输电工程为了实现在电压等级和传输功率方面的提升, 设计结构与传统直流输电工程有所不同: 单极使用 2 个十二脉动换流单元串联的结构, 替代了传统直流输电单极单十二脉动换流单元的结构。为了满足运行灵活性的要求, 双十二脉动换流单元串联的直流输电系统必须提供在线投入 1 个换流单元的功能, 这个特殊的功能控制与常规的单换流单元起停控制策略不同。

由于换流单元投入需要经过 1 个大角度、大电流运行的零功率解锁过程。如果换流单元从零功率解锁到稳态运行的时间过长, 会增加交流系统的无功消耗, 对交流系统产生较大影响, 如电压跌落和换向失败, 甚至产生系统振荡^[1]。因此对于换流单元投入过程必须进行相关研究, 提出新的控制方案。

1 换流单元投入的实际控制策略分析

换流单元在线模型如图 1 所示，可以用于分析换流单元投入的实际过程。

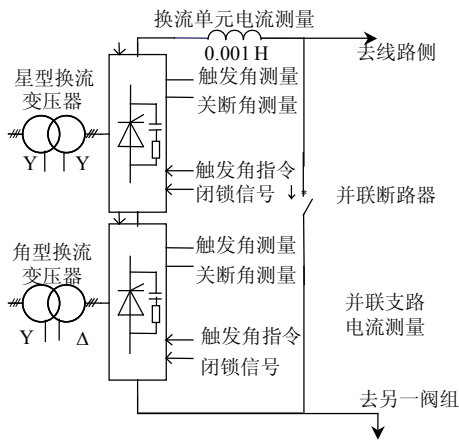


图 1 换流单元在线模型

Fig. 1 Converter connecting online model

换流单元投入实质上是把直流电流从旁路断路器中拉到换流单元中，目前工程采用逐渐减小触发角方法，这种方法可以避免较大的冲击电流，但达不到快速要求；利用控制系统中的电流调节器也可以实现换流单元的在线投入，但可能发生过调和振荡现象。而定电流控制器参数的优化方案则是通过调整定电流调节器的相关逻辑，就能达到换流单元投入过程的快速和稳定^[2-4]。

结合实际直流工程动态性能的相关要求，提出与换流单元在线投入相关的动态性能指标：

- 1) 电流的超调量不能过大(不超过 30%)^[5]。电流的大小直接影响了换流阀的无功消耗，在极端情况下会引起交流侧电压跌落，影响系统的稳定性^[4]。
- 2) 过渡时间约定为小于 100 ms，电流的过渡时间直接决定了旁路断路器的打开时刻，是换流单元投入功能是否完善的重要指标(允许的换流单元投入时间设为 100 ms)^[1,5]。
- 3) 其他相关控制系统的稳定指标。如增益裕度和相位裕度，则根据控制理论和直流输电工程的实际情况，选择增益裕度 $G_m > 6$ dB，相位裕度 $70^\circ > P_m > 30^\circ$ ^[6]。

结合上述换流单元投入的动态响应指标，从而在投入的控制策略上提出不同的方法，再进行比较，就能得到适合换流单元投入的控制策略，并给出优化的参数配置。

2 定电流调节器的选择

2.1 传统控制方式

常规的直流输电系统在两端都设有电流调节

器，并且在逆变侧加入电流裕度控制。实际的直流输电工程中，换流单元的电流比例积分(proportional integral, PI)调节器参数是由长线路情况下直流电流的阶跃响应结果来配置。一般情况下主定电流调节器只使用一套参数。

然而在特高压直流系统换流单元投入的过程中，需要换流单元快速建立运行电流，但是换流单元两端通过旁路断路器相连，其动态特性与常规直流输电系统的动态特性有较大的差异。仿真试验证明，在换流单元投入过程中，使用在长线路情况下配置的主调节器参数动态响应较差，如图 2 所示。因此，可以针对换流单元投入过程使用一套完全不同的调节器参数，或者使用一个完全不同的调节器。

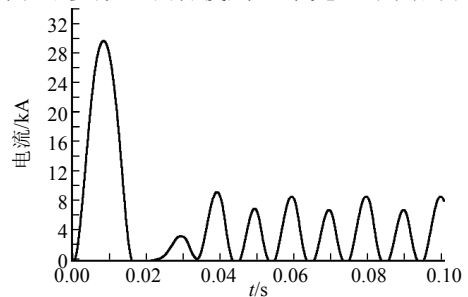


图 2 常规电流调节器的换流单元投入过程的响应曲线

Fig. 2 The response curve of the converter unit with the common regulation

目前调节器参数配置的主要方法是传统的试凑法^[7]。试凑法是完全凭借经验尝试参数的方法，在现代计算机技术和仿真技术飞速发展的环境下，已经不能满足工程的需要。

配置电流调节器参数的基本方法是依据经典控制理论和离散数字控制器的相关原理，在换流单元动态建模的基础上，运用 Matlab 和 EMTDC 等仿真软件得到动态指标理想的控制器参数。

2.2 换流单元的动态建模

2.2.1 换流单元动态仿真方案

换流单元模型如图 3 所示，图中： D_z 为主电流 PI 调节器； G_c 为换流单元的传递函数； I_{dref} 为电流参考值； I_{DNC} 为系统的输出电流量。在整个换流单元的建模中，非线性环节是换流阀单元。如果能给换流阀单元 G_c 建立一个等效的线性数学模型，则可以对整个模型数学化，并用控制理论的知识进行参数优化和调节器校正。

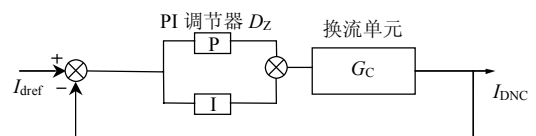


图 3 换流单元模型

Fig. 3 Converter unit model

由直流输电系统的物理拓扑可以将整个直流输电系统抽象为一个单输入单输出的模型, 输入为触发角, 输出为流过换流单元的电流(或电压)。首先, 在交流系统侧是强交流系统环境下, 系统侧阻抗值比较小(符合实际情况), 交流电压幅值扰动量非常小, 相比角度变化对直流系统的影响可以忽略, 因此交流电压幅值可以视为恒定, 交流系统可以视为恒定的交流电源; 交流滤波器连接组数和换流变压器分接头的动作时间在 5 s 级别以上, 所以在暂态过程中维持不变。这种情况下, 整流侧直流仿真模型(如图 1 所示)只有一个控制输入量(触发角指令), 没有外界扰动量。其次, 由直流输电理论可知, 十二脉动换流单元输出对应于直流侧是一个电压源, 电流由直流电压差引起(如图 1 所示), 但旁路断路器闭合模型中固定的电压下输出固定的电流(电阻固定)。因此十二脉动换流单元可以等效为单输入单输出系统。

对换流单元建模主要有 2 种方法: 1) 运用理论分析, 建立换流阀的解析模型; 2) 时域法下的过程辨识和建模。这里采用第 2 种方法。在不能精确模拟对象物理特性的条件下, 如果只关心对象的外部特性, 而不关注对象内部状态时, 可以把对象看成一个黑箱进行处理。过程辨识就是通过测取所研究的被控过程在人为输入作用下的输出响应, 或者正常运行时的输入输出数据记录, 估计出被控过程的数学模型。一般常用的模型辨识方法有时域法、参数估计法和频域法。这里采用比较简单的时域法, 给对象加入一个阶跃输入, 测取输出的响应。

时域法的模型建立: 为了得到准确的换流单元传递函数, 必须取得多组非常标准的阶跃响应数据, 才能进行模型辨识和曲线估计。

考虑到实际仿真装置在精度上的不足, 所以选择成熟的电磁暂态仿真软件 EMTDC 进行建模和阶跃响应试验。

直流同一极上有 2 个十二脉动换流单元, 一个完全描述, 另一个已经工作的串联换流器按照等值原理描述。由于在投入的过程中另一个十二脉动换流器已经稳态运行, 如果本侧交流系统属于强交流系统, 即短路电流大于 50 kA(向上直流工程的短路容量高达 63 kA, 满足这一条件), 则在投入换流单元的过程中母线交流电压能够得到维持, 从而不影响另一个换流单元的稳态运行。在上述假设条件下, 整流侧稳态运行的换流单元可以用一个电流源

来替代, 电流源的电流就是换流单元的工作电流(由 PSCAD 仿真软件可证实, 在稳态运行的换流单元用完整模型和电流源等效的条件下, 对串入换流单元的过程进行仿真, 直流系统的动态过程没有变化)。因此可以用图 4 所示的电路模型来研究换流单元串入系统的动态特性^[6]。

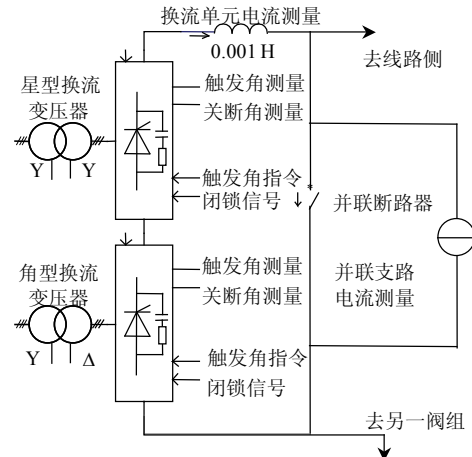


图 4 EMTDC 换流单元模型

Fig. 4 EMTDC converter model

2.2.2 换流单元的模型辨识

在 EMTDC 仿真环境下进行换流单元的模型辨识, 首先需要得到换流单元的电流阶跃响应数据。把触发角指令从 163° 设置为 84°, 就得到了流过换流单元的电流响应曲线, 如图 5 所示。

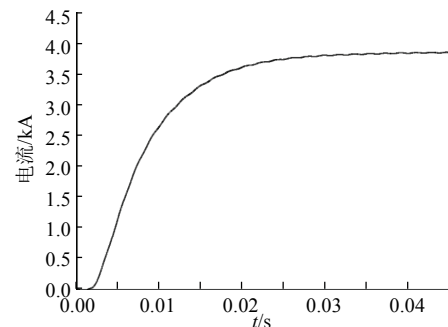


图 5 84° 触发角 I_{DNC} 动态响应

Fig. 5 I_{DNC} transient response curve with alpha order 84°

由图 5 可见, 触发角指令阶跃变化下, 换流单元直流电流的动态曲线与 2 阶传递函数近似, 因此可以使用 2 阶传递函数对直流电流进行拟合, 从而得到换流单元触发角阶跃变化的电流响应曲线的近似传递函数为

$$G_C = K \frac{\omega^2}{s^2 + \varepsilon\omega s + \omega^2} \quad (1)$$

式中: G_C 为换流器模型的传递函数; K 为 2 阶环节的增益; s 为拉普拉斯算子; ε 为阻尼系数; ω 为无阻尼的自然振荡频率。

通过设置不同触发角, 得到 1 组电流阶跃响应

曲线，对相应曲线进行拟合，确定一组 K 、 ω 、 ξ 参数；分析所有的 K 、 ω 、 ξ 参数，选取最合适的一组，从而得到传递函数的具体表达式。

由于换流器从 163° 解锁到投入的过程中，投入过程的触发角工作点可能范围为 $80^\circ\sim 90^\circ$ 。选取 89° 、 88° 、 87° 、...、 80° 这 10 个触发角指令，在图 4 所示的模型上进行试验，得到一组电流响应，并对每一条电流响应曲线进行 2 阶曲线拟合。试验证明，不论触发角设置多少度，动态响应曲线的类型相同、形状基本相似。拟合曲线的参数以及拟合曲线与原始曲线的误差见表 1。

表 1 拟合计算参数

Tab. 1 The parameter calculation of curve fitting

触发角/(°)	增益 K	阻尼系数 ξ	自然振荡频率 ω /(rad/s)	误差 $\epsilon/10^{-4}$
80	6.630 1	1	258.6	24.5
82	5.221 6	1	258.61	<20
83	4.531 9	1	258.65	<20
84	3.852	1	258.75	<20
85	3.182	1	258.92	<20
86	2.522 3	1	259.22	<20
87	1.872 8	1	259.39	<20
88	1.233 7	1	259.49	<20
89	0.605 21	1	259.59	<20

由表 1 可知，触发角在 $80^\circ\sim 90^\circ$ 范围内，曲线拟合的误差较小，拟合曲线可以等效为原曲线。 80° 时的误差最大是 2.45×10^{-4} 。触发角为 84° 时拟合曲线与原始曲线的比较见图 6。

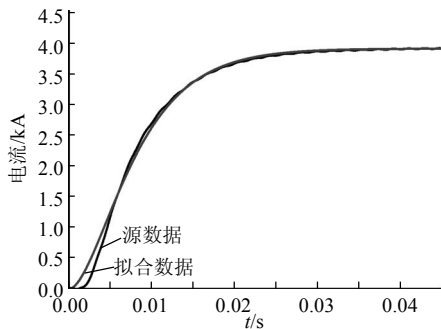


图 6 拟合结果和原始结果比较

Fig. 6 The curve fitting figure compared with the original figure

对 10 组 2 阶拟合曲线的参数仔细观察后可知，参数 ω 、 ξ 变化较小，可以固定；增益指标 K 变化较大，且 $\Delta\alpha$ （触发角的阶跃量）和 K 之间存在非线性关系。由直流输电的理论可以知道， $\Delta\alpha$ 和 K 之间存在一个 $\sin\alpha$ 的非线性环节。在增益参数的校正中，如果在前向的控制环节中，加入 $1/\sin\alpha$ 的非线性增益环节^[1]。整个系统流程的开环传递函数可以变为

$$G_O = G_{PI} \sin \alpha G_C \sin \alpha \quad (2)$$

式中： G_O 为整个换流单元建模环节的传递函数； G_{PI} 为前向 PI 控制器的传递函数； G_C 为换流器模型的传递函数。

如此，增益 K 的非线性得到补偿，这时 $\Delta\alpha$ 和 K 之间存在线性关系，整个系统进行了线性化。数学建模可以表达成为

$$G_O = G_{PI} G_C \quad (3)$$

经过调整和多次试验，最终建立了换流器单元的传递函数模型，选择参数指标为 $K=3.852$ 、 $\omega=258.75$ 、 $\xi=1$ 。用该组参数得到的曲线与原始曲线进行对比，误差小于 0.1%，说明参数选择合理。由于模型是用来对 PI 控制器进行参数校验，因此 PI 调节器本身就具备了很强的鲁棒性。选取额定工况下(电流为 4 kA)误差最小的拟合曲线参数，由上面的分析可知，参数选择不会影响参数优化的结果。

依据上文建立的换流单元连续传递函数模型，对整个换流单元投入的系统进行详细建模，如图 7 所示。

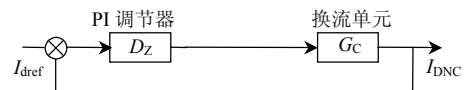


图 7 传递函数

Fig. 7 Transfer function drawing

2.2.3 模型的离散化

从直流控制保护系统触发角计算的环节可以得知，直流控制保护触发角的计算不是 1 个连续过程，每次都是在上 1 个触发信号发出的时候计算下 1 个触发脉冲的时间位置，而对系统在 2 个触发脉冲之间的变化不予考虑。因此可以认为触发脉冲控制系统是 1 个采样时间 T_s 为 $1/600$ s 的离散响应，而信号输入环节的采样时间为 $70 \mu s$ ，小于控制系统的采样时间 T_s 。考虑到 PI 参数校正的目的，可以忽略信号输入环节采样时间，而把整个模型看成 1 个采样时间为 T_s 的离散系统。再考虑使用标幺值，由此可得到如图 8 所示的系统离散化模型。

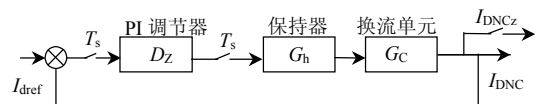


图 8 离散化模型

Fig. 8 Discretion model

PI 调节器是数字调节器，其在离散采样系统中的传递函数为

$$D_z = K_p + \frac{T_s}{T_i} \frac{1}{1-z^{-1}} \quad (4)$$

保持器使用零阶保持器，其传递函数为

$$G_h = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \quad (5)$$

通过式(4)(5)并结合图 7, 进行 z 变换(约定使用双线性变化法)^[8], 实现带数字调节器的换流单元的整体建模。

2.2.4 新型的参数配置方案

把复杂的非线性换流单元系统进行等效线性化后, 在纯线性环境下进行参数配置优化, 得到最优参数的可行解。这种方法可以充分减轻试凑参数的复杂性^[9]。参数配置的程序设计基本思路为:

1) 选择参数 K_p 和 T_i 可能的取值范围, 选择范围的标准是尽可能大, 包含最优参数; 选取 K_p 的步长为 $0.1n$ (n 取 1~20 的整数), T_i 为 $1/k$ (k 取 1~1 000 的整数)。

2) 选取合适的相位裕度 P_m 和增益裕度 G_m , 由相关的自动控制理论知识可知动态响应较好的最小相位控制系统的裕度指标为

$$\begin{cases} G_m > 6\text{dB} \\ 70^\circ > P_m > 30^\circ \end{cases}$$

3) 根据裕度指标求出 PI 调节器的参数 K_p 和 T_i 的可行域。

4) 根据直流输电动态响应的超调量和响应时间指标, 筛选较优的 K_p 和 T_i 。

5) 提出适应换流单元投入过程的新控制系统积分指标 ITAE^[6], 优选 K_p 和 T_i , 记录下最优解的 n_0 和 k_0 。

6) 在最优解附近区域选取较小的步长进行计算, K_p 为 $n_0 + 0.01n$ 、 T_i 为 $1/(k_0 + 0.01k)$ 。

7) 重新计算控制系统的积分指标 ITAE, 优选 K_p 和 T_i 。

8) 得到最优的数组 K_p 和 T_i 的解。

9) 在 EMTDC 环境下进行仿真检验, 验证最优解的可行性, 并根据实际响应微调^[9-11]。

经过数学工具的帮助和大量的调试, 得到了 K_p 和 T_i 的最优解为: $K_p = 0.98$, $T_i = 0.0064$ 。

2.2.5 验证分析

用逐渐降低触发角控制方法得到的 I_{DNC} 响应曲线如图 9 所示, 可以看出直流电流没有超调量, 响应时间在 30 ms 左右。

用第 2 种控制方法(配置电流调节器参数法)产生的 I_{DNC} 响应曲线如图 10 所示。

通过优化后的控制器对从 2~4 kA 的不同电流指令值都有很好的暂态性能, 所以具有比较好的鲁棒

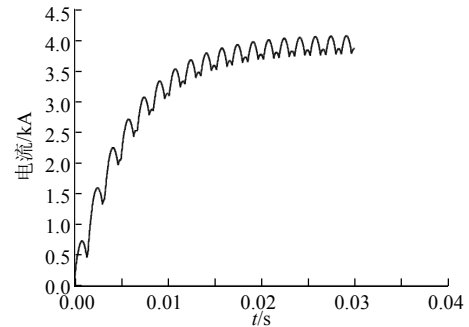


图 9 直接触发角设置的方法的响应曲线
Fig. 9 The response curve by the mean of directly setting alpha

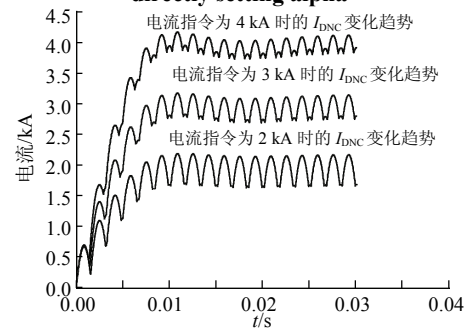


图 10 优化调节器参数的方法的响应
Fig. 10 The response curve by the mean of optimized regulation parameter

性。同时, 观察电流响应曲线可以看到, 电流超调量小于 3%, 响应时间在 10 ms 左右, 即 10 ms 以后, 换流单元就能串入直流系统中运行; 暂态响应时间和超调量比使用原始控制环节较小。

对于最小功率起动问题, 本文也做了相应的仿真试验, 实验结果见图 11, 由图可见, 当电流指令为 0.4 kA 时, 阀组解锁以后的触发角较大(约 90°), 脉动电流的幅值很高^[4], 非常容易产生过零点。优化参数后的调节器能适应换流单元快速在线投入的要求。

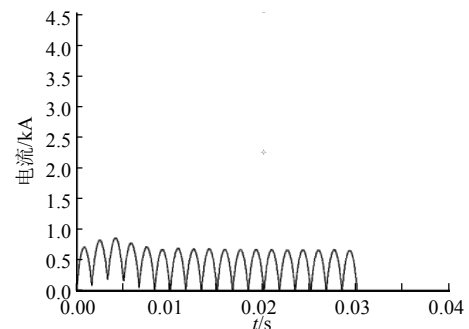


图 11 电流指令为 0.4 kA 时调节器特性
Fig. 11 The response of regulation when the current order is 0.4 kA

3 结论

1) 对于在线投入换流单元的特殊功能, 传统方法的动态响应无法满足要求, 本文提出使用电流

调节器来克服^[12-13]。

2) 通过换流单元的数学建模, 离散化控制器等, 直流环节可以等效为一个纯数学环节进行仿真模拟^[14]。

3) 经过数字 PI 调节器的新型参数优化方法, 得到了适用与换流单元在线投入的电流控制器。实验证明, 使用新的电流 PI 调节器参数, 换流单元投入的动态指标和动态响应曲线都有较大改善。

4) 在本文建模过程中, 忽略了交流电压的波动; 在以后的研究中, 可以加入这个因素组建完整的数字化网络模型, 通过真实仿真, 使课题的研究更加深入。

参考文献

- [1] 马玉龙, 陶瑜, 周静, 等. 基于实时数字仿真器的特高压直流换流单元投入特性分析[J]. 电网技术, 2007, 31(21): 5-10.
Ma Yulong, Tao Yu, Zhou Jing, et al. Analysis on deblocking and blocking characteristics of UHVDC commutation units based on real-time digital simulator[J]. Power System Technology, 2007, 31(21): 5-10(in Chinese).
- [2] 石岩, 韩伟, 张民, 等. 特高压直流输电工程控制保护系统的初步方案[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 11-15.
Shi Yan, Han Wei, Zhang Min, et al. A preliminary scheme for control and protection system of UHVDC project[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 11-15(in Chinese).
- [3] 马为民. ± 800 kV 特高压直流系统换流器控制[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 71-74, 110.
Ma Weimin. Converter control for ± 800 kV UHVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 71-74, 110(in Chinese).
- [4] 陶瑜, 龙英, 韩伟. 高压直流输电控制保护技术的发展与现状[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 8-10.
Tao Yu, Long Ying, Han Wei. Status and development of HVDC control and protection[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 8-10(in Chinese).
- [5] 赵晔君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 234-237.
- [6] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985: 18-23.
- [7] 朱艺颖, 曾南超, 王明新, 等. 葛南直流输电改造工程控制系统静态特性的实验研究[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 1-6.
Zhu Yiyang, Zeng Nanchao, Wang Mingxin, et al. Experimental study on control system static characteristics of Gezhouba to Nanqiao DC transmission renovation project[J]. Power System Technology, 2004, 28(20): 1-6(in Chinese).
- [8] 夏德今. 自动控制理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 234-237.
- [9] 杨汾艳, 徐政, 张静. 直流输电比例-积分控制器的参数优化[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 15-20.
Yang Fenyan, Xu Zheng, Zhang Jing. Study on parameter optimization of HVDC PI controllers[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 11-15(in Chinese).
- [10] 赵成勇, 张一工, 施惠, 等. 直流输电控制系统参数优化[J]. 中国电力, 1999, 32(1): 34-36.
Zhao Chengyong, Zhang Yigong, Shi Hui, et al. Parameter optimization of the HVDC control system[J]. Electric Power, 1999, 32(1): 34-36(in Chinese).
- [11] 倪林林, 陶瑜. 葛洲坝—上海直流输电工程控制调节系统参数的[J]. 电网技术, 1989, 13(3): 26-31.
Ni Linlin, Tao Yu. Parameter optimization of the control and regulating system of Gezhouba-Shanghai HVDC project[J]. Power System Technology, 1989, 13(3): 26-31(in Chinese).
- [12] 罗德彬, 汪峰, 徐叶玲. 国家电网公司直流输电系统典型故障分析[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 35-39.
Luo Debin, Wang Feng, Xu Yeling. Analysis on typical faults in SGCC's HVDC projects[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 35-39(in Chinese).
- [13] 张建设, 张尧, 张志朝, 等. 直流系统控制方式对大扰动后交直流混合系统电压和功率恢复的影响[J]. 电网技术, 2005, 29(5): 20-24.
Zhang Jianshe, Zhang Yao, Zhang Zhichao, et al. Influence of DC system control modes on voltage and power recovery after large disturbance in hybrid AC/DC systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 20-24(in Chinese).
- [14] Manitoba HVDC Research Centre Inc. PSCAD user's guide[M]. Winnipeg: Manitoba HVDC Research Centre Inc, 2003: 234-237.



穆清

收稿日期: 2010-07-04。

作者简介:

穆清(1983), 男, 硕士研究生, 主要从事直流输电控制保护系统特性和仿真方面的研究工作,

E-mail: abel.qing.mu@gmail.com;

王明新(1954), 男, 教授级高级工程师, 主要从事直流输电技术研究;

曾南超(1941), 男, 教授级高级工程师, 主要从事直流输电技术研究。

(编辑 张磊)