

DOI: 10.7667/PSPC151172

广东电网远景直流落点优化研究

龙志¹, 杨柳², 姚文峰²

(1. 中国南方电网有限责任公司, 广东 广州 510623; 2. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080)

摘要: 随着广东电力需求的快速增长和西电东送直流输电规模的进一步扩大, 广东电网直流落点日趋密集, 导致多回直流相互影响加剧、受端系统电压支撑能力不足、系统稳定性变差等一系列问题, 对电网规划和运行均提出新的挑战。为从根本上解决上述一系列安全稳定问题, 引入基于 CIGRE 直流工作组的多馈入直流短路比(MISCR)概念。通过整体性、均衡性、干扰性以及综合性 4 个指标衡量多直流间相互影响, 提出了一种兼顾多直流相互影响、稳定性、经济性影响的综合比较方法, 可量化比较各项评价指标, 具有操作性强的特点, 能够适应多直流集中馈入广东电网的直流落点优化, 提高电网稳定性。

关键词: 广东电网; 直流落点优化; 多直流相互影响; 稳定性; 经济性; 综合性

Guangdong power grid DC placement optimization

LONG Zhi¹, YANG Liu², YAO Wenfeng²

(1. China Southern Power Grid, Guangzhou 510623, China; 2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510080, China)

Abstract: With the further advance of the rapid social and economic development and the power transmission from west to east, Guangdong power grid HVDC is gradually intensive, resulting in a series of problems, such as HVDC interaction intensified, end system voltage supporting ability is insufficient, the system stability becomes worse, and putting forward the new challenge to the power system planning and operation. To fundamentally solve a series of safety and stability problems above, this paper introduces the multi infeed MISCR concept based on the CIGRE DC working groups. Through the integrity, balance, interference and comprehensiveness indicators to measure the interaction of multiple HVDC, it presents a comprehensive comparison method considering interaction between multiple DC stability, economic effect quantitative comparison of evaluation indicators, which has the operational characteristics of the DC optimal placement, can adapt to multi DC concentrated feed in Guangdong power grid, and improve power system stability.

Key words: Guangdong power grid; DC placement optimization; interaction between multiple DC; stability analysis; economic analysis; comprehensive analysis

0 引言

随着广东电力需求的快速增长和西电东送直流输电规模的进一步扩大, 广东电网直流落点日趋密集, 在满足电力供应的同时随之带来一系列新问题, 如多回直流相互影响加剧、受端系统电压支撑能力不足、系统稳定性变差等。因此, 直流落点优化是一个受多因素影响的复杂电力系统问题, 从电力供应角度, 应优先落点电力缺口较大地区; 从直流运行条件角度, 应考虑落点电源支撑能力较强地区; 从多直流相互影响角度, 应拉开直流间电气距离。上述关键影响因素间又有矛盾之处, 比如电力缺口较大的地区往往电源支撑能力不足, 导致直流

运行条件较差; 广东电力缺口主要集中在面积较小的珠三角地区, 多回直流集中送入又会加剧直流间相互影响; 此外还存在控制短路电流与短路电流水平下降后直流运行条件变差之间的矛盾等等。因此, 需要协调各方影响因素之间的矛盾, 找到一个平衡点。

在只有一回直流输电系统接入交流电网的分析中, 短路比(SCR)/有效短路比(ESCR)作为评价交流系统相对强弱的重要量化指标, 广泛应用于直流输电系统规划、设计和运行中交直流相互作用及其有关问题的分析。随着受端电网直流馈入回路数的增加, 多回直流输电系统落点于同一交流电网、且多个逆变电站之间电气距离不能视为无穷大而必须计

及相互间影响时,采用针对单馈入直流输电条件下的量化分析指标评估交流系统的相对强弱是不恰当的。

国际大电网会议多馈入直流系统研究工作组(CIGRE WG B4-41 Systems with Multiple HVDC Infeed)总结大量前期研究成果,提出评估多馈入直流系统中邻近逆变站相互作用特性以及交流系统相对强弱的量化指标,包括多馈入相互作用因子(MIIF)和多馈入有效短路比(MIESCR)。然而,由于短路比是一个相对宏观的结构性指标,很难与电网的具体动态行为和表征建立一一对应的指示关系。因此,一直以来都缺少有效的研究来系统和客观地评价短路比指标及其改进是否恰当,以及如何有效地运用这些指标具体指导和定量评价受端电网的规划和运行状态。

本文基于多馈入直流短路比(MISCR)提出整体性、均衡性、干扰性以及综合性4个指标定量评估多直流间相互影响,并进一步研究提出了一种兼顾多直流相互影响、稳定性、经济性影响的综合比较方法,可量化比较各项评价指标,具有较强操作性,能够适应多直流集中馈入广东电网的直流落点优化,提高电网稳定性^[1-7]。

1 多直流集中馈入受端系统的直流落点优化方法

首先基于电力平衡筛选出直流落点的候选片区,然后电网规划人员根据经验在直流落点的候选片区制定有限数量的直流落点方案,再从多直流相互影响、安全稳定性以及经济性等方面进行综合分析,选取技术经济综合最优的直流落点方案。

对于多直流相互影响问题的研究,引入基于CIGRE直流工作组的多馈入短路比(MISCR)、多馈入有效短路比(MIESCR)概念。

多馈入短路比(MISCR)是评估多回直流接入的交流系统对直流系统支撑能力的指标。第*i*回直流系统 MISCR 定义为

$$MISCR_i = \frac{S_{aci}}{P_{deqi}} = \frac{1}{|Z_{eqii}|P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n |Z_{eqij}|P_{dj}} \quad (1)$$

式中: $MISCR_i$ 为第*i*回直流所对应的多馈入短路比; Z_{eqii} 为等值阻抗矩阵中第*i*回换流母线所对应的自阻抗; Z_{eqij} 为等值阻抗矩阵中第*i*回换流母线和第*j*回换流母线之间的互阻抗; P_{di} 为第*i*回直流的额定功率, MW; P_{dj} 为第*j*回直流的额定功率, MW。

若在相应直流换流母线上考虑并联无功补偿的影响,则可得到多馈入有效短路比(MIESCR),第

*i*回直流系统 MIESCR 定义为

$$MIESCR_i = \frac{S_{aci} - Q_{ci}}{P_{deqi}} = \frac{1/|Z_{eqii}| - 1/|Z_{ci}|}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{|Z_{eqij}|}{|Z_{eqii}|} P_{dj}} \quad (2)$$

针对多馈入短路比(MISCR)提出整体性、均衡性、干扰性3个指标衡量多直流馈入受端电网直流落点,并通过标准化和归一化得到综合性评价指标, MISCR 指标体系是体现电网分区联络方式、直流落点密集程度、当地电源支撑等多种因素的综合指标。

具体计算公式如下:

(1) MISCR 的整体性指标

$$I_{\text{sum}}(i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n M_{ij} \quad (3)$$

反应不同直流落点方案对交直流系统强弱的影响。其值越大,方案越具有优越性。式中, $i=1, \dots, p$,对应第*i*个直流落点方案(下同); M_{ij} 为第*i*个方案对应的第*j*回直流的多馈入短路比数值。

(2) MISCR 的均衡性指标

$$I_{\text{bal}}(i) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n [M_{ij} - I_{\text{sum}}(i)]^2} \quad (4)$$

反应所有直流系统的 MISCR 相对整体性指标的均衡性,避免因个别直流 MISCR 过低,导致整个受端支撑能力弱,防止“木桶效应”初显。其值越小,方案越具有优越性。

(3) MISCR 的干扰性指标

$$I_{\text{inf}}(i) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m [M_j(0) - M_{ij}] \quad (5)$$

反应规划新增直流对已有直流 MISCR 的影响,其值越小,表示规划新增直流对已有直流的影响越小,方案越具有优越性。式子, $M_1(0), M_2(0), \dots, M_m(0)$ 为已有 *m* 回直流系统在电网中多馈入短路比的大小。

(4) 指标标准化

由于上述3项指标单调方向不同,采用极差变化方法对指标进行标准化处理:

$$\begin{cases} \hat{I}_{\text{sum}}(i) = \frac{I_{\text{sum}}(i) - \min(I_{\text{sum}})}{\max(I_{\text{sum}}) - \min(I_{\text{sum}})} \\ \hat{I}_{\text{bal}}(i) = \frac{\max(I_{\text{bal}}) - I_{\text{bal}}(i)}{\max(I_{\text{sum}}) - \min(I_{\text{sum}})} \\ \hat{I}_{\text{inf}}(i) = \frac{\max(I_{\text{inf}}) - I_{\text{inf}}(i)}{\max(I_{\text{inf}}) - \min(I_{\text{inf}})} \end{cases} \quad (6)$$

通过上述的标准化,4项指标均同向单调,即

经过标准化后的指标数值越大,则方案越好;且上述4项指标数值在[0,1]区间内,数量级一致,且均无量纲。式中, \min 和 \max 分别取指标矩阵中的最小值和最大值。

(5) MISCR 的综合性指标

$$S(D) = \lambda_1 \hat{I}_{\text{sum}} + \lambda_2 \hat{I}_{\text{bal}} + \lambda_3 \hat{I}_{\text{inf}} = \Lambda D \quad (7)$$

采用线性加权求和的方法提出综合指标, $S(D)$ 指标越大,则说明方案越具有优越性。式中, $A=[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]$ 为加权系数,满足 $\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3=1$ 的约束。

2 远景直流落点方案拟定

根据南方电网中长期电力流,2016年~2030年规划新增4条5000 MW 直流落点广东电网,“十三五”期间新增2条直流,输送云南、缅甸水电合计10000 MW;2021~2030年间新增2条直流,输送缅甸水电10000 MW。

2.1 直流落点筛选

首先对广东电网进行分区电力平衡,按照直流优先落点电力缺口地区和分散直流落点的原则,筛选直流落点区域及备选站址。

为便于分析新增直流落点区域,将广东电网划分为珠三角东南部、珠三角东部、珠三角北部等8个分区进行电力平衡。平衡结果见表1。

表1 广东电网8分区电力平衡表
(计及规划电源,不计规划直流)

Table 1 Power balance sheet of Guangdong power grid eight partition

8分区电力盈 (+)亏(-)表	MW			
	计及规划电源,不考虑 2015年以后规划直流		计及规划电源和 2020年前直流	
	2020年	2030年	2020年	2030年
珠三角东南部	-8 724	-10 120	-3 974	-5 370
珠三角东部	-9 755	-14 002	-5 005	-9 252
珠三角北部	-3 698	-12 498	-3 698	-12 498
珠三角西部	-6 383	-9 162	-6 383	-9 162
珠三角西南部	2 681	4 275	2 681	4 275
粤东	9 838	12 802	9 838	12 802
粤西	5 182	10 727	5 182	10 727
粤北	2 856	1 602	2 856	1 602

从广东8分区电力平衡结果来看,“十三五”期间规划投产的2个直流宜落点缺口最大的珠三角东南部和珠三角东部。珠三角东南部备选站址考虑电力缺口较大的深圳沙井站址,珠三角东部备选站址考虑电力缺口较大的东莞沙田站址和惠州城西站址。考虑2020年前规划的2直流后,到2030年,

珠三角北部电力缺口最大超过12000 MW,应优先考虑落点1直流,珠三角北部备选站址可考虑电力缺口较大的佛山东坡站,2030年天广直流回收后可充分利用线路走廊及落点北郊站,另外也可考虑直流落点云肇地区利用西电东送交流通道送往负荷中心地区。

计及3个规划直流落点后,2030年珠三角东部、北部及西部这3个地区电力缺口仍均超过9000 MW。从直流电力消纳的角度来看,2030年前规划的最后1条直流(即缅甸芒基直流)可分别落点这3个地区,其中珠三角西部备选站址可考虑阳江核电近区的恩平站址,置换大型核电点对网送至负荷中心。新增直流落点区域及备选站址见表2。

表2 2016年~2030年新增直流落点区域及备选站址

Table 2 In 2016~2030 new HVDC area and alternative station site

直流名称	落点区域	备选站址
十三五新增直流1	珠三角东南部	深圳沙井
十三五新增直流2	珠三角东部	东莞沙田、惠州城西
2021-2030年 新增直流1	珠三角北部	佛山东坡、广州北郊
2021-2030年 新增直流2	珠三角东部、 北部或西部	

2.2 方案拟定

考虑缅甸芒基直流分别落点珠北、珠西以及珠东地区拟定以下3个方案。

(1) 方案1: 芒基直流落点珠北电网方案

2016~2030年规划的2条直流分别落点珠东地区的沙田站和珠东南地区的沙井站。规划第3条直流落点珠北地区的北郊站,芒基直流落点珠北地区的东坡站。

(2) 方案2: 芒基直流落点珠西电网方案

2016~2030年规划前3条直流落点方案同方案1。为拉开珠北地区直流落点之间的电气距离,将芒基直流落点由东坡站调整到珠西的恩平站,置换阳江核电外送电力,阳江核电通过点对网送往珠北地区,加强珠北电网电源支撑能力,同时减弱直流间的相互影响。

(3) 方案3: 芒基直流落点珠东电网方案

2016~2030年规划的2条直流分别落点珠东地区的沙田站和珠东南地区的沙井站。规划第3个直流落点珠北地区的东坡站,芒基直流落点珠东地区的城西站。

2015~2030年广东电网直流落点分析示意如图1所示。

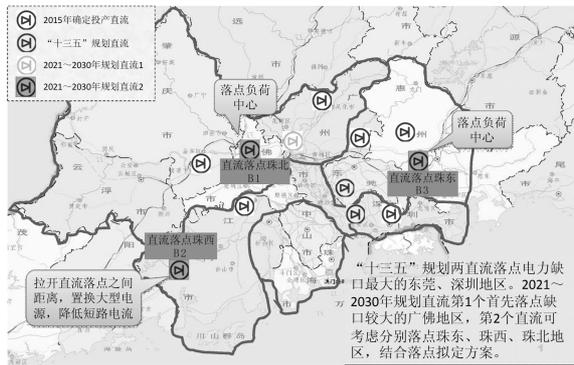


图 1 2015~2030 年广东电网直流落点分析示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 2015~2030 HVDC analysis of Guangdong power grid

3 方案技术优化研究

3.1 多回直流相互影响分析

多回直流相互影响分析主要采用直流逆变器站多馈入有效短路比(MIESCR)和多馈入短路比(MISCR)的整体性、均衡性、干扰性以及综合性评价指标。

(1) 各方案 MIESCR 分析

可以看出,通过优化直流落点,直流落点珠西方案 2 将直流从地方电源少且直流落点密集的珠北地区移动至直流落点稀疏的珠西地区,可在一定程度上提高直流逆变器站的 MIESCR。2030 年丰腰方式广东电网直流逆变器站 MIESCR 见表 3。

表 3 2030 年丰腰方式广东电网直流逆变器站 MIESCR

Table 3 In 2030, the medium abundant water mode of Guangdong power grid inverter MIESCR

方案	鹅城	肇庆	宝安	穗东	鹤山	汾水	沙田	沙井	东坡	北郊	城西	恩平
B1	2.25	1.68	3.47	1.98	3.61	1.75	1.99	3.43	1.71	1.72		
B2	2.45	1.93	3.61	2.20	2.78	2.09	2.20	3.55		2.02		2.48
B3	1.86	3.03	3.03	1.78	3.64	1.90	1.91	3.12	1.86		1.83	

(2) 各方案 MISCR 的整体性、均衡性、干扰性以及综合性分析

从计算结果可看出,直流落点珠西方案 B2 中直流落入电源支撑强的区域,综合指标较高。直流落点珠北方案 B1 和直流落点珠东方案 B3 直流落点地方电源少且目前已经有多回直流馈入的珠北和珠东地区,加剧直流间相互影响,综合指标相对较差。2030 年丰腰方式 MISCR 的指标见表 4。

表 4 2030 年丰腰方式 MISCR 的指标表

Table 4 Index table of MISCR in 2030, the medium abundant water mode

方案	整体性指标	均衡性指标	干扰性指标	综合指标
B1	0.143	0	0.118	0.09
B2	1	0.957	0.265	0.838
B3	0	0.043	0	0.014

3.2 安全稳定分析

安全稳定分析采用机电暂态仿真程序(中国电科院的 BPA 电力系统分析程序),主要通过系统抵御严重故障的能力来评价,包括从失稳故障数量和为消除失稳故障需安装的 STATCOM 容量两方面进行比较^[8-11]。

优化直流落点和网架结构可进一步提高电网稳定性,对于抵御三相短路中开关单相拒动严重故障能力也有一定改善。直流落点珠北方案 1 和落点珠西方案 2 抵御严重故障的能力较强,系统的稳定

性较好,计及确定的 STATCOM 并优化 VDCL,在恩平和普宁等站点新增 3 200~3 900 Mvar 的 STATCOM 后,仅有阳江和台山 2 个核电三相短路中开关单相拒动故障引起系统失稳,直流落点珠东方案 3 所需新增的 STATCOM 规模比方案 B1 和 B2 多 1 700~2 400 Mvar。2030 年故障扫描情况见表 5,加装 STATCOM 后中开关单相拒动故障扫描情况见表 6^[12-14]。

表 5 2030 年故障扫描统计

Table 5 Fault scan statistics for 2030

方案	N-1 故障 (失稳线路数)		N-2 故障 (失稳线路数)		中开关单相拒动 (失稳站点数)	
	丰大	丰腰	丰大	丰腰	丰大	丰腰
	B1	0	0	4	4	6
B2	0	0	4	4	5	14
B3	0	0	4	4	6	17

表 6 2030 年中开关单相拒动故障扫描
(加装 STATCOM, 含确定的 800 Mvar)

Table 6 Scan of single switch in 2030

方 案	直流控 制策略	中开关单相拒动 (失稳站点)		STATCOM 容量/ Mvar	
		丰大	丰腰	丰大	丰腰
		B1			1 800
B2	优化 VDCL	阳江核电		1 000	3 200
B3		台山核电		2 800	5 600

4 方案经济性比较分析

直流落点方案经济性主要结合电网投资、年运行费等指标进行直接比较,重点比较各方案的相对差异,在测算相对投资的基础上,采用年费用法对不同网架方案进行经济比较。

$$NF = Z \left[\frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} \right] + u \quad (8)$$

式中: NF 为方案相对年费用; Z 为方案相对总投资; u 为方案相对年运行费,分为运行维护费和电能损耗费,其中运行维护费按工程相对总投资的 2% 计算,电能损耗费按最大损耗小时数 3 500 h 考虑,电价按 0.5 元/kWh 考虑; r_0 为电力工业投资回收率,按 8% 考虑; n 为工业经济使用年限,输变电设备按 25 年进行计算。

从方案相对投资来看,直流落点珠北方案 1 投资最省;从相对网损来看,方案 1 直流直接落点珠北负荷中心地区损耗较小,减少大规模电源送入负荷中心地区,其网损也比最低;从整体经济性来看,直流落点珠北方案 1 投资较省,网损小,经济性最好,相对年费用比其他方案省 0.9~1.2 亿元。方案经济性比较见表 7。

综合以上技术经济分析,第 4 回直流落点珠北方案 1 和落点珠西方案 2 综合指标相对较高,落点珠东方案 3 技术经济指标均较差,不考虑。

表 7 方案经济性比较

Table 7 Economic comparison of schemes

方案	方案 1	方案 2	方案 3
一、方案相对总投资/万元	0	20 850	82 000
二、方案相对年运行费用/万元	0	7 105	4 424
1、运行维护费/万元	0	417	1 640
2、电能损耗费/万元	0	6 688	2 784
相对网损/MW	0	41.8	17.4
三、方案相对年费用/万元	0	9 059	12 106

5 结论

研究提出了一种优化多直流集中馈入受端系统直流落点的方法,首先根据电网分区电力电量平衡和分散直流落点原则拟定直流落点候选方案。基于 CIGRE 直流工作组的多馈入短路比(MISCR)概念,提出整体性、均衡性、干扰性 3 个单相指标和一个综合性指标,评估不同直流落点方案的多直流间相互影响程度,并综合分析安全稳定性、经济性

等,提出远景广东直流落点优化方案。

综合技术经济优化比较,得出广东电网 2016~2030 年直流落点优化结论:2020 年前广东规划的 2 条直流宜落点电力缺口较大的珠三角东部东莞地区和珠三角东南部深圳地区;2021~2030 年规划投产的 2 直流可落点电力缺口较大的珠三角北部的广州北部地区和佛山地区,为减少珠三角北部地区直流集中落入,也可考虑将落点佛山的直流调整到邻近的江门地区,置换阳江核电外送电力,阳江核电通过点对点网送往珠北地区。

参考文献

- [1] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126, 131.
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126, 131.
- [2] 赵睿, 张英敏, 李兴源, 等. 提高送端多直流落点系统暂态稳定性的非线性控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 7-12.
ZHAO Rui, ZHANG Yingmin, LI Xingyuan, et al. Nonlinear control strategy for improving the transient stability of sending ends multi-feed HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 7-12.
- [3] 徐政. 含多个直流换流站的电力系统中交直流相互作用特性综述[J]. 电网技术, 1998, 22(2): 16-19.
XU Zheng. AC/DC and DC/DC interactions of multiple HVDC links terminating in the same AC system[J]. Power System Technology, 1998, 22(2): 16-19.
- [4] 李峰, 管霖, 钟杰峰, 等. 广东交直流混合电网的运行稳定性研究[J]. 电网技术, 2005, 29(11): 1-4.
LI Feng, GUAN Lin, ZHONG Jiefeng, et al. Study on stability of Guangdong AC/DC hybrid power grid[J]. Power System Technology, 2005, 29(11): 1-4.
- [5] 周保荣, 金小明, 吴小辰, 等. 溪洛渡、糯扎渡直流输电规模对南方电网安全稳定影响[J]. 南方电网技术, 2009, 3(1): 7-11.
ZHOU Baorong, JIN Xiaoming, WU Xiaochen, et al. The influence of the capacities of Xiluodu and Nuozhadu HVDC projects on security and stability of China Southern Power Grid (CSG)[J]. South Power System Technology, 2009, 3(1): 7-11.
- [6] 邵瑶, 汤涌, 郭小江, 等. 多直流馈入华东受端电网暂态电压稳定性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 50-55.
SHAO Yao, TANG Yong, GUO Xiaojiang, et al. Transient

- voltage stability analysis of East China receiving-end power grid with multi-infeed HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 50-55.
- [7] 李从善, 刘天琪, 刘利兵, 等. 直流多落点系统自抗扰附加阻尼控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 10-17.
LI Congshan, LIU Tianqi, LIU Libing, et al. An auto-disturbance rejection controller of multi-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 10-17.
- [8] 朱劲松, 李磊. 基于模块化多电平换流器的 STATCOM 分析与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 113-117, 124.
ZHU Jingsong, LI Lei. Analysis and control of STATCOM based on modular multilevel converters[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 113-117, 124.
- [9] 邹蕴韬, 谭亲跃, 朱建行, 等. 超高压线路串补电容的微机保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 45-49.
ZOU Yuntao, TAN Qinyue, ZHU Jianhang, et al. Microprocessor-based protection algorithm in UHV transmission lines with series compensated capacitor[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 45-49.
- [10] 郭三明, 孙鹏荆, 敬树仁, 等. 基于预测模型的 STATCOM 功率控制策略建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 88-92.
GUO Sanming, SUN Pengjing, JING Shuren, et al. Research on modeling and simulation of power control method for STATCOM based on predictive model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 88-92.
- [11] 靳玮玮, 杨兴超, 余存, 等. 功率计划在特高压直流输电工程中的传输和实现[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 143-147.
JIN Weiwei, YANG Xingchao, YU Cun, et al. Transmission and realization of the power plan in UHVDC transmission project[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 143-147.
- [12] 顾雪平, 王大江, 梁海平, 等. 电力系统扩展黑启动方案动态综合评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 44-52.
GU Xueping, WANG Dajiang, LIANG Haiping, et al. Dynamic comprehensive assessment of power system extended black-start plans[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 44-52.
- [13] 易桂平, 胡仁杰, 蒋玮, 等. 电网电压不平衡对 STATCOM 的影响及抑制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 238-247.
YI Guiping, HU Renjie, JIANG Wei, et al. Influence of grid voltage unbalance on STATCOM and the countermeasure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 238-247.
- [14] 阮俊, 王恒利, 孙华美, 等. 三相逆变器输出直流分量的抑制[J]. 电器与能效管理技术, 2015(5): 41-45.
RUAN Jun, WANG Hengli, SUN Huamei, et al. Eliminating output DC component in three phase inverter[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(5): 41-45.

收稿日期: 2015-07-08; 修回日期: 2016-01-07

作者简介:

龙志(1983-), 男, 工程硕士, 工程师, 从事电力系统研究和项目管理工作; E-mail: longzhi@csg.cn

杨柳(1982-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统规划设计及电网安全稳定分析等工作;

姚文峰(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统规划设计及电网安全稳定分析等工作。

(编辑 葛艳娜)