

特高压直流输电线路 $1\,250\text{ mm}^2$ 截面 导线选型研究

周 唯, 吴子怡

(西南电力设计院, 四川 成都 610021)

摘 要: 特高压直流输电线路导线选型及分裂形式研究是特高压直流输电技术的重要课题, 它对线路的输送容量、传输性能、环境问题、线路走廊宽度、房屋拆迁范围、技术经济指标都有很大的影响。中国经济发达地区用电量日益增长, 新建电网系统规划输送容量也随之增大, 大截面导线在特高压线路中亟待广泛应用。通过对多种 $1\,250\text{ mm}^2$ 大截面线型进行详细的技术经济比较分析, 提出特高压直流输电线路导线的选型方案, 希望能对中国电网工程设计起到一定的借鉴和帮助作用。

关键词: 特高压; 直流输电线路; 导线; 输送容量

Abstract: The study on the conductor type selection and division mode of UHV DC transmission line is an important subject of UHV DC transmission technology, which will have a great impact on transmission capacity, transmission performance, environmental issues, corridor width, housing demolition scope, technical and economic indicators. The electricity demand of the developed area in China is growing, so the transmission capacity of newly - built power grid increases and the large section conductor will be widely used in UHV transmission lines. Based on the detailed technical and economical comparison and analysis for the types of $1\,250\text{ mm}^2$ section conductors, the type selection scheme for the conductors of UHV DC transmission lines is proposed, which provides some useful references for the power engineering design.

Key words: ultra high voltage (UHV); DC transmission line; conductor; transmission capacity

中图分类号: TM721 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2014)06 - 0024 - 05

0 引 言

近年来, 国家电网公司从中国能源战略高度出发, 综合分析中国能源分布、能源传输需求和发展变化趋势, 确定了建设以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强智能电网。众所周知, 特高压直流输电线路具有输送容量大、送电距离远、输电损耗小、节省线路走廊等优点。国家电网公司先后开工建设了 $\pm 660\text{ kV}$ 宁东—山东、 $\pm 800\text{ kV}$ 向家坝—上海、 $\pm 800\text{ kV}$ 锦屏—苏南、 $\pm 800\text{ kV}$ 哈密—郑州以及 $\pm 800\text{ kV}$ 宁东—浙江等特高压直流输电线路工程, 同时开展了 720 、 900 、 $1\,000$ 、 $1\,250$ 、 $1\,520\text{ mm}^2$ 等大截面导线研制及工程应用研究。

特高压直流输电线路导线选型及分裂形式研究是特高压直流输电技术的重要课题, 它对线路的输送容量、传输性能、环境问题包括电场效应(静电场、合成场强、离子流密度、人或物体的感应电压)、

无线电干扰、电视干扰及可听噪声等、对线路走廊宽度及房屋拆迁范围、对输电线路的技术经济指标都有很大的影响。因此, 进行特高压直流输电线路导线截面及分裂形式的研究对攻克特高压输电线路技术难关和降低造价有着十分深远的意义。

特高压直流线路架线工程投资一般占本体投资的 30% 左右, 再加上导线方案变化引起的杆塔和基础工程量的变化, 其对整个工程的造价影响是极其巨大的, 直接关系到整个线路工程的建设费用以及建成后的技术特性和运行成本, 所以在整个输电线路的技术经济比较中, 应该对导线的截面和分裂型式进行充分的技术经济比较, 推荐出满足技术要求而且经济合理的导线截面和分裂型式。通过对 $1\,250\text{ mm}^2$ 截面多种线型开展详细的技术经济比较分析, 提出特高压直流输电线路 $1\,250\text{ mm}^2$ 截面导线选型推荐方案, 希望能对中国电网工程设计起到一定的借鉴和帮助作用。

1 导线选择控制参数

输电线路的导线截面和分裂型式,宜根据系统需要按照经济电流密度选择,也可根据系统输送容量,结合不同导线的材料结构进行电气和机械特性等比选,并应满足可听噪声和无线电干扰等技术条件的要求,通过年费用最小法进行综合技术经济比较后确定。

根据中国 GB 50790-2013《±800 kV 直流架空输电线路设计规范》规定,钢芯铝绞线和钢芯铝合金绞线的允许温度可采用 +70 ℃(大跨越不得超过 90 ℃),钢芯铝包钢绞线(包括铝包钢绞线)的允许温度可采用 +80 ℃(大跨越不得超过 100 ℃);钢绞线的允许温度可采用 125 ℃。合成场强和离子流密度: ±800 kV 直流线路下方最大地面合成场强的控制指标为 30 kV/m。邻近民房的最大合成场强的控制指标为 25 kV/m;线路下方离子流密度的控制指标为一般地区为 100 nA/m²,居民区为 80 nA/m²。地面磁场强度:对直流磁场,国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)导则给出一般公众的磁场暴露参考水平(1 Hz 以下)为 40 mT。实际情况下直流磁场对人的影响比交流磁场小得多。而且实际计算结果远远小于此参考值,故不必考虑磁场干扰影响问题。无线电干扰限值:距直流架空输电线路正极性导线对地投影外 20 m 处由电晕产生的 0.5 MHz 无线电干扰场强 80% / 80% 值,一般地区不超过 58 dB(μV/m)。海拔 1 000 m 以上,按照每增加 300 m,增加 1 dB(μV/m)修正。可听噪声限值:海拔 1 000 m 及以下地区,距直流架空输电线路正极性导线对地投影外 20 m 处由电晕产生的可听噪声(L_{50})不超过 45 dB(A);海拔高度大于 1 000 m 且线路经过人烟稀少地区时,控制在 50 dB(A)以下。机械强度:导线设计安全系数不小于 2.5,悬挂点的设计安全系数不小于 2.25,平均运行应力不大于拉断应力的 25%。验算覆冰气象条件时,弧垂最低点的最大张力不超过拉断力的 60%,悬挂点的最大张力不超过拉断力的 66%^[1]。

2 分裂间距选择

从电气方面看,导线存在最佳分裂间距,使得表

面电场强度最小,但根据计算分析,限制次档距振荡要求的分裂间距才是控制条件。

限制次档距振荡要求的分裂间距与最佳电气性能要求的分裂间距是矛盾的,中国已建 500 kV 交、直流线路的 S (截面)/ d (直径)比值在 13.80 ~ 18.7,但由于特高压线路导线的分裂数较多,电气要求又比较苛刻,因此布置上要比 500 kV 线路困难得多,一般难以满足上述要求。由于特高压线路由于分裂根数的增加,在采用大截面导线时,很难保证 $S/d > 13.8 \sim 18$ 。但根据国内外已建特高压直流线路设计和运行的情况分析, S/d 的比值在 10 ~ 18 之间也能满足线路的安全运行。同时,次档距振荡还可通过采用适当增加间隔棒安装数量的方法加以限制。根据国内外已建工程情况和有关研究成果,推荐特高压直流线路 1 250 mm² 截面导线分裂间距按表 1 选取。

表 1 导线分裂间距及 S/d 值一览表

分裂根数	分裂间距 S /mm	分裂导线圆直径 D /mm	S/d
6	500	1 000	10.44 ~ 11.68

注: d 为子导线直径,mm。

3 导线选择类型

中国超高压、特高压输电线路采用的大截面导线类型包含:钢芯铝绞线、钢芯铝型线绞线、铝合金绞线、铝合金芯铝型线绞线等线型。

3.1 钢芯铝绞线

钢芯铝绞线是由硬圆铝线及镀锌钢线组合绞制而成,它是输电线路最常用的一种导线。这里选取了 JL1/G3A-1250/70 和 JL1/G2A-1250/100 两种 1 250 mm² 截面的钢芯铝绞线参与导线选择比较^[2]。

3.2 钢芯铝型线绞线

国家电网公司和中国电科院组织相关导线生产厂家补充开展了 1 250 mm² 大截面型线导线的研制工作。根据研制情况,这里选择了 JL1X1/G3A-1250/70 和 JL1X1/G2A-1250/100 两种大截面钢芯铝型线绞线参与导线选型比较。

3.3 铝合金绞线

目前在世界许多国家的输电线路已广泛使用铝合金导线,它们主要是高强度铝合金线。为了在一般轻、中冰区线路中采用铝合金导线,国内外开发

表 2 机械特性比较表

项 目	JL1/G3A - 1250/70	JL1X1/G3A - 1250/70	JL1/G2A - 1250/100	JL1X1/G2A - 1250/100	JL1X1/LHA1 - 800/550	JLHA3 - 1350
导线类型	钢芯 铝绞线	钢芯铝 型线绞线	钢芯铝 绞线	钢芯铝型 线绞线	铝合金芯铝 型线绞线	中强度全铝 合金导线
铝丝直径 /mm	4. 58	5. 07	4. 35	5. 17	4. 82	
铝丝股数	76	62	84	60	44	
结 构 钢(铝合金) 丝直径 /mm	3. 57	3. 57	2. 61	2. 61	4. 35	
钢(铝合金) 丝股数	7	7	19	19	37	
铝(铝合金) 绞丝	1 252. 09	1 259. 88	1 248. 38	1 259. 57	802. 86	1 352. 41
截面积 /mm ²						
铝合金芯	0	0	0	0	549. 88	
钢芯	70. 07	70. 07	101. 65	101. 65		
总计	1 322. 16	1 329. 95	1 350. 03	1 361. 22	1 352. 74	1 352. 41
导线直径 /mm	47. 35	43. 11	47. 85	43. 71	45. 15	47. 85
钢芯外径 /mm	10. 7	10. 7	13. 1	13. 1	0	0
单位重量 /(kg · km ⁻¹)	4 011. 1	4 055. 1	4 252. 3	4 303. 7	3 726. 8	3 738. 7
计算拉断力 /N	294 230	289 180	329 850	325 350	289 000	295 500
弹性模量 /(N · mm ⁻²)	62 200	62 100	65 200	65 100	55 000	55 000
线性膨胀系数 [× 10 ⁽⁻⁶⁾](1/℃)	21. 1	21. 1	20. 5	20. 5	23	23
20 ℃ 时直流电阻 /(Ω · km ⁻¹)	0. 02 291	0. 022 92	0. 023	0. 022 92	0. 022 46	0. 022 1

了 LHA3 中强度铝合金线,其导电率为 58. 5% IACS,允许温度为 90 ℃。这里选择了 6 × JLHA3 - 1350 中等强度铝合金绞线参与导线选择比较^[2,4]。

3.4 铝合金芯铝型线绞线

将钢芯铝绞线中的钢芯换为铝合金,可降低导线电阻,减少能损,即新型节能导线。这里选择了与 JL1/G2A - 1250/100 钢芯铝绞线的电气性能、结构型式相近的 JL1X1/JLHA1 - 800/550 铝合金芯铝型线绞线进行比较^[5]。

三种导线的机械特性比较详见表 2 所示。

4 导线基本电气性能计算

导线电气性能的计算主要包括导线电流密度、过负荷温度、传输功率及功率损耗等,并对参选导线方案进行计算比较。双极直流输电线路电力线和带电离子分布详见图 1 所示。双极直流输电线路地面电力线解析图详见图 2 所示。

特高压直流输电线路导线选择的关键因素之一是使电磁环境参数满足设计规范要求的限值。通过对各种导线方案,进行合成场强、无线电干扰和可听噪声的估算,参选各大截面导线方案在电气性能各

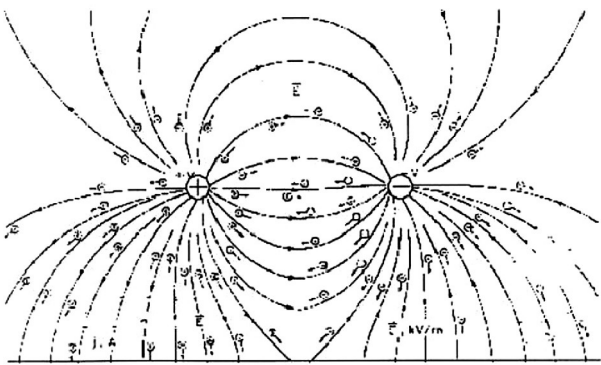


图 1 双极直流输电线路电力线和带电离子分布示意图

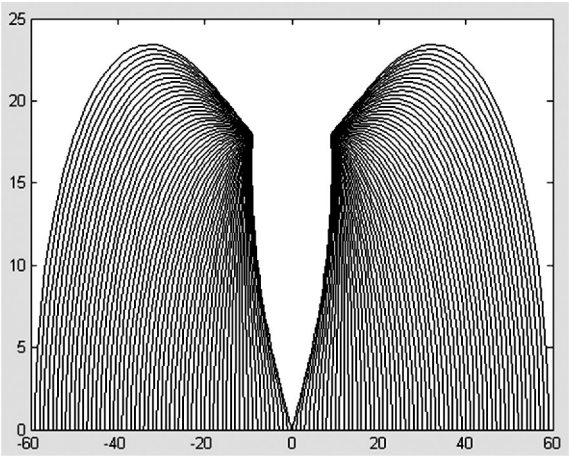


图 2 双极直流输电线路地面电力线解析图

表 3 导线电气特性一览表

序号	1	2	3	4	5	6
导线型号	JL1/G3A - 1250/70	JL1X1/G3A - 1250/70	JL1/G2A - 1250/100	JL1X1/G2A - 1250/100	JL1X1/LHA1 - 800/550	JLHA3 - 1350
分裂数	6	6	6	6	6	6
电流密度 / ($A \cdot mm^{-2}$)	0.666	0.661	0.668	0.662	0.616	0.616
过负荷导线温度 / $^{\circ}C$	64.3	63.9	64.6	64.1	64.5	64.3
传输效率 / %	95.30	95.30	95.20	95.2	95.4	95.6
导线表面最大电场强度 / ($kV \cdot cm^{-1}$)	18.39	19.63	18.22	19.45	18.62	18.22
地面合成场强 / ($kV \cdot m^{-1}$)	26.95	26.88	26.59	26.84	26.71	26.59
地面离子流 / ($nA \cdot m^{-2}$)	34.82	34.55	33.47	34.4	33.92	33.47
电阻功率损耗 / ($kW \cdot km^{-1}$)	102.866	102.738	103.308	102.892	101.743	99.155
电晕损耗 / ($kW \cdot km^{-1}$)	11.82	12.66	11.53	12.47	12.05	11.53
无线电干扰 / dB	53.3	53.7	53.2	53.7	53.5	53.2
可听噪声 / dB	40.12	43.03	39.8	42.6	41.1	39.8

注:表中各性能中合成场强、地面离子流特性的计算导线高度取 18 m,其余各特性导线对地高取平均高 23 m,极间距离取 16.5 m,海拔高度为 2 000 m,晴天。

表 4 导线弧垂、过载性能一览表

比较项目	JL1/G3A - 1250/70	JL1X1/G3A - 1250/70	JL1/G2A - 1250/100	JL1X1/G2A - 1250/100	JL1X1/LHA1 - 800/550	JLHA3 - 1350
最大应力 10 MPa	8.623	8.423	9.468	8.623	8.423	9.468
年均应力 10 MPa	5.389	5.264	5.917	5.389	5.264	5.917
安全系数	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
铝钢截面比	17.869	18.002	12.281	17.869	18.002	12.281
过载冰厚 / mm	$L_p = 400$	32.42	33.51	34.73	35.81	30.18
	$L_p = 500$	30.43	31.62	32.37	33.54	29.66
	$L_p = 600$	29.28	30.52	30.98	32.2	28.32
最大弧垂 40 $^{\circ}C$ / m	$L_p = 400$	12.619	12.922	12.008		
	$L_p = 500$	19.045	19.525	18.1	18.51	18.112
	$L_p = 600$	26.844	27.544	25.487	26.084	25.44

注:过载时,导线最低点的最大张力达到其计算拉断力 60% 时相应的计算覆冰厚度。

表 5 导线荷载一览表

导线型号	JL1/G3A - 1250/70	JL1X1/G3A - 1250/70	JL1/G2A - 1250/100	JL1X1/G2A - 1250/100	JL1X1/LHA1 - 800/550	JLHA3 - 1350	备注
导线分裂数	6	6	6	6	6	6	
每公里导线 / ($t \cdot km^{-1}$)	48.13	48.71	51.03	51.64	44.88	44.86	两极
无冰垂直荷重(kN/极)	141.61	143.31	150.12	151.94	132.03	131.99	
/ %	100.00%	101.20%	106.01%	107.29%	93.23%	93.21%	垂直档距
有冰垂直荷重(kN/极)	200	197.37	208.98	206.58	190.99	190.96	$L_w = 600$
/ %	100.00%	98.68%	104.49%	103.29%	95.50%	95.48%	
大风时线条风荷 重(kN/极)	90.01	81.99	90.96	83.15	90.96	90.96	水平档距
/ %	100.00%	91.09%	101.06%	92.38%	101.06%	101.06%	$L_h = 500$
纵向最大张力(kN/极)	590	568	651	630	599	604	
/ %	100.00%	96.30%	110.36%	106.76%	101.48%	102.31%	
配合耐张串型	4 $\times$ 550 kN、3 $\times$ 760 kN						

注:采用 4 联 550 kN 耐张串时,JL1/G2A - 1250/100 导线的安全系数需放松为 2.55,最大荷载时安全系数大于 2.7,满足强度要求。根据弧垂特性计算情况,档距 800 m 时,15 mm、20 mm 冰区的弧垂增加约 1 m,对塔高影响较小。

表 6 本体投资及投资差额比较

注: 单位(万元/km)							
序号	导线型号 及分裂数	塔材 费用	基础 费用	架线 费用	附件 费用	估算本 体投资	本体 投资差
1	6 × JL1 / G3A - 1250 / 70	135. 7	48. 90	133. 94	64. 41	382. 95	0
2	6 × JL1X1 / G3A - 1250 / 70	131. 7	47. 45	135. 08	64. 19	378. 42	- 4. 53
3	6 × JL1 / G2A - 1250 / 100	141. 2	50. 89	139. 38	64. 19	395. 66	12. 71
4	6 × JL1X1 / G2A - 1250 / 100	136. 5	49. 19	140. 85	64. 19	390. 73	7. 78
5	6 × JL1X1 / LHA1 - 800 / 550	136. 2	49. 06	141. 05	64. 19	390. 5	7. 55
6	6 × JLHA3 - 1350	136. 3	49. 11	152. 05	64. 19	401. 65	18. 7

方面指标均满足 GB 50790 - 2013《± 800 kV 直流架空输电线路设计规范》规定的电磁环境限值要求。三种导线的电气特性参数详见表 3 所示。

5 导线机械性能比较

比选导线的最大应力、年均应力、安全系数、铝钢截面比、过载冰厚、最大弧垂 40 ℃ 及导线荷载等比较详见表 4 和表 5。

所选 6 种导线而言,电磁环境限值指标不是导线选择的控制条件,对于 15 mm、20 mm(中、重) 冰区导线,主要受导线机械性能控制。通过以往大量输电线路 10 mm、15 mm、20 mm(中)、20 mm(重) 冰区导线设计及运行经验,从线路的安全运行、导线的机械和电气性能方面考虑,在 10 mm 轻冰区的平丘地段建议采用 JL1 / G3A - 1250 / 70 钢芯铝绞线、JL1X1 / G3A - 1250 / 70 钢芯铝型线绞线,在平丘及一般山地段可采用节能新型 JL1X1 / LHA1 - 800 / 550 铝合金芯铝型线绞线; 在 10 mm 山区段、15 mm、20 mm(中、重) 冰区均可采用 JL1 / G2A - 1250 / 100 钢芯铝绞线、JL1X1 / G2A - 1250 / 100 钢芯铝型线绞线、JLHA3 - 1350 全铝合金绞线等导线型式。

6 导线经济性比较

对于每一种导线方案,在不同的工程条件下本体投资均有所不同,在假定边界条件下对各导线方案初期本体投资进行估算,重点比较导线投资的差额。这里按目前设计原则及假定工程边界条件,对各导线方案的初期投资进行估算,本体投资及投资差额比较详见表 6 所示。

根据导线的年费用比较,年费用最低的是

JL1X1 / G3A - 1250 / 70 钢芯铝型线绞线,其次是 JL1 / G3A - 1250 / 70 钢芯铝绞线,再次是 JL1X1 / LHA1 - 800 / 550 铝合金芯铝型线绞线。通过导线价格变化对年费用敏感性进行分析,在考虑不同导线对铁塔及基础工程量产生影响的条件下,即按照型线和圆线分别设计铁塔,在钢芯铝型线的单价不高于同型号圆线钢芯铝绞线单价的 10% 时,采用钢芯铝型线绞线具有长期运行经济性。同样,对于 JL1 / LHA2 - 800 / 550 铝合金芯铝型线绞线,其机电性能满足工程要求,在目前导线单价情况下,其年费用高于圆线和钢芯铝型线绞线,当其单价下降 7% 左右时,其年费用将低于圆线和钢芯铝型线绞线^[4]。

7 结 论

通过电气性能、机械性能及对铁塔荷载设计的影响,综合设计、杆塔规划、导线制造、架线施工、运行维护及经济性等多方面因素,并结合中国国情和自然条件的实际情况,建议采用 1 250 mm² 大截面导线输电的特高压直流线路工程,在 10 mm 冰区的平丘地形推荐采用 JL1 / G3A - 1250 / 70 钢芯铝绞线; 在一般山地及 15 mm、20 mm 中、重冰区推荐采用 JL1 / G2A - 1250 / 100 钢芯铝绞线,导线分裂间距均为 500 mm。在交通运输方便地区,可适当选用 JL1X1 / G3A - 1250 / 70、JL1 / G2A - 1250 / 100 钢芯铝型线绞线作为输电导线,为以后特高压直流输电线路设计应用积累工程经验。

参考文献

- [1] GB 50790 - 2013, ± 800 kV 直流架空输电线路设计规范 [S]. (下转第 48 页)

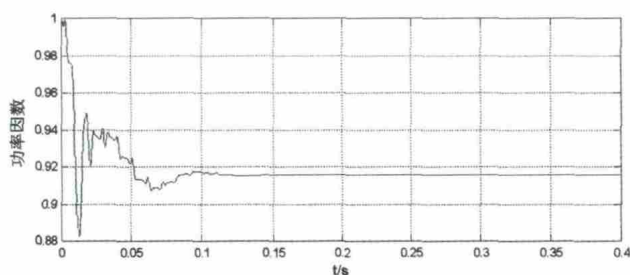


图 13 并入滤波器 A 相功率因数

于补偿了谐波消耗的无功功率,从而提高了功率因数。此时的功率因数并未达到国家标准,还需要结合使用无功补偿装置。从而将无源动态滤波器和 TSC 并联在电网中来达到提高电能质量的目的。

5 结 论

基于双可控电抗器的双调谐滤波器,具有较强的自动调节能力,较为精准的调谐结果。作为传统无源滤波器的改进,弥补了现行双调谐滤波器的缺点。因其兼顾无功补偿作用,选择与 TSC 组合使用,从而达到消除谐波和无功补偿的作用。

参考文献

- [1] 苏恒. 双调谐滤波器设计与失谐问题的研究 [D]. 江门: 五邑大学, 2013.
- [2] 马世贤. 基于可控电抗器的双调谐滤波器研究与设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [3] 徐平凡, 陈忠仁, 肖星. TSC 动态无功补偿装置的仿真研究 [J]. 电源技术应用, 2012(3): 32 - 35.

- [4] 倪常茂. 基于多调谐滤波器和 TSC 的混合型无功补偿滤波技术研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2012.
- [5] 崔士杰, 汪建华. 基于 MATLAB 的单相全控整流电路功率因数测定 [J]. 武汉工程大学学报, 2010(1): 90 - 92.
- [6] 王会涛, 钱希森, 任开春. 基于 Matlab 的功率因数校正电路的仿真分析 [J]. 电源世界, 2007(3): 40 - 42.
- [7] 倪常茂, 刘振兴. 基于双调谐滤波器和 TSC 的混合型无功补偿滤波装置 [J]. 电力自动化设备, 2012(7): 124 - 128.
- [8] 马世贤, 康明才, 黄锦安. 全控/部分可控双调谐滤波器仿真试验 [J]. 2006 中国电力系统保护与控制学术研讨会论文集, 2006: 4.
- [9] 徐永海, 王铭诚. 双调谐滤波器的参数选择 [J]. 现代电力, 1995(2): 6 - 11.
- [10] 肖遥. 双调谐滤波器和三阶滤波器的参数计算 [J]. 湖北电力, 2000(2): 5 - 6.
- [11] 董海波, 张丽, 罗剑锋. 双调谐滤波器在矿井电网谐波治理中的应用研究 [A]. 中国煤炭学会自动化专业委员会, 2008: 3.
- [12] 李崇. 基于双可控电抗器的双调谐滤波器研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [13] 陈敏. 无源动态谐波滤波器的建模与仿真 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.

作者简介:

沙宏哲(1990), 工学硕士研究生, 主要研究无源动态滤波器和 TSC 的无功补偿、电力系统及其自动化;

冯媛硕(1988), 工学硕士研究生, 主要研究高压直流输电系统仿真、电力系统及其自动化。

(收稿日期: 2014 - 07 - 17)

(上接第 28 页)

- [1] 何健, 陈光. 新型铝合金芯铝绞线在输电线路中的应用 [J]. 吉林电力, 2011, 15(2): 45 - 49.
- [2] GB/T 1179 - 2008, 圆线同心绞架空导线 [S].
- [3] 叶鸿声. 中强度全铝合金导线在输电线路中的应用 [J]. 电力建设, 2010, 31(12): 10 - 20.
- [4] 万建成, 李健, 陈媛, 等. 铝合金芯铝型绞线在大容量直流线路中的应用 [J]. 电力建设, 2013, 34(8): 105 - 106.

- [5] 布春磊, 周海鹰, 江明. 特高压直流输电线路大截面钢芯铝绞线选型研究 [J]. 电力建设, 2013, 34(9): 102 - 104.

作者简介:

周 唯(1982), 硕士, 工程师, 从事输电线路技术设计工作;

吴子怡(1981), 硕士, 工程师, 从事电网工程造价设计工作。

(收稿日期: 2014 - 07 - 25)