

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.12.015

移相变压器在特高压直流双极闭锁故障中的应用

张仲驰,童伟林,王建全*

(浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要:特高压直流输电系统双极闭锁故障时会导致输电断面上大量功率的瞬间缺失,从而使部分联络线严重过负荷。针对该问题,提出了在特定线路装设移相变压器来将过载联络线的部分潮流转移到其他轻载联络线上,从而减少了直流线路故障时所需切除的负荷量,提高了电网的供电可靠性。通过讨论移相器的数量和选址问题,总结出了不同情况下的决策方法,并以一个总负荷约为22 000 MW的大系统为例,确定了移相器的类型和具体模型,并推导和计算了移相器的相关参数,利用PSASP平台仿真出了不同移相角时各联络线的潮流。研究表明,移相器能够实现联络线之间输送功率的转移,充分利用了输电断面上联络线的输电能力,从而能够改善特高压直流闭锁故障带来的输电断面联络线过载问题。

关键词:移相变压器;特高压直流双极闭锁;联络线;潮流转移;电力系统分析综合程序

中图分类号:TM41;TM712

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)12-1496-05

Application of phase-shifting transformers in UHVDC transmission system under bipolar block faults

ZHANG Zhong-chi, TONG Wei-lin, WANG Jian-quan

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The bipolar block faults of UHVDC transmission system can lead to instantaneous large power deficiency in the transmission section, which make part of the tie-lines heavily overload. Aiming at this problem, installing phase-shifting transformers in particular transmission lines to transfer part of power flow from over-load tie-lines to other light-load tie-lines was proposed, which can reduce the amount of load that needs to be shed and improve the power supply reliability of the power grid when the bipolar block faults take place. Through discussing the quantity and location problem of phase-shifting transformers, the decision-making methods under different circumstances were summarized and a large scale power system whose total load is about 22 000 MW was taken as an example. The type and concrete model of phase-shifting transformer were decided and the relevant parameters of the phase-shifting transformer were derived and calculated. The power flow of each tie-line at different phase-shifting angles was simulated using PSASP. The results indicate that phase-shifting transformers can realize power flow transfer between tie-lines and make full use of the transmission capability of the tie-lines on the transmission section, which can reduce the tie-line overload caused by bipolar block faults of UHVDC transmission system.

Key words: phase-shifting transformer(PST); bipolar block faults in UHVDC; tie-line; power flow transfer; power system analysis software package(PSASP)

0 引言

近年来,我国已陆续建成多条特高压直流线路,并
有其他线路正在建造或者计划建造,例如于2015年6

月正式开工的酒泉至湖南±800 kV特高压直流输电
工程,以及于2015年12月获得国家发改委核准的
±1 100 kV准东至皖南特高压直流输电工程。

随着我国电力系统单机容量进一步提高,同时特

收稿日期:2016-07-01

作者简介:张仲驰(1992-),男,安徽安庆人,主要从事电力系统暂态稳定方向的研究. E-mail: zhangzhongchi@gmail.com

通信联系人:王建全,男,副教授,硕士生导师. E-mail: wangjq@zju.edu.cn

高压交直流输电系统的发展使得区域间联络线和远距离大容量输电系统日益增多,区域之间的联系日益增强。系统的运行方式和运行工况将出现一些新的变化,使电力系统动态行为变得越来越复杂。单个直流输电系统输送容量较大,一旦双极闭锁或双极短时间内相继闭锁,直流系统输送的功率会迅速转移到并联的 500 kV 交流通道上,使得交流通道过负荷、系统无功需求激增、系统电压陡降,甚至导致 500 kV 交流线路的连锁跳闸^[1]。为了减轻特高压直流线路的严重故障,需要对受电区域采取切负荷、增加发电机出力等一系列的紧急控制措施。然而,特高压直流通道上输送的大量功率的瞬间缺失所带来的输电断面功率失衡,仅仅通过切负荷、增加出力往往是难以消除的,其代价也是难以接受的。

移相变压器可以实现按照一定方向和一定功率的潮流控制,改变潮流分布,进而避免输电线路或变压器主设备过负荷,提高供电可靠性,并实现合理分配线路潮流以提高输电断面功率^[2]。基于机械式有载调压开关的传统移相器已在欧美国家的电网中得到了广泛应用。而随着现代电力电子技术的快速发展,基于晶闸管控制的新型静止移相器(thyristor controlled phase-shifting transformer, TCPST)设计陆续被提出,并在电网中得到应用。

本研究提出在特高压直流线路的受电系统的合适位置安装移相变压器,在直流双极闭锁故障时的紧急控制中通过调节移相器的移相角,来提高系统在特高压直流投入运行后的稳定性和可靠性。

1 移相器的相关问题

1.1 移相器的选址问题

对于移相器选址问题,文献[3]将装设移相器的数量和位置都作为决策变量,将装设移相器后电网每年在生产成本上获得的收益与移相器的总投资额的比例作为目标函数,将所有线路都作为候选安装位置,采用基于遗传算法的优化算法寻找最优解。虽然这种方法理论上可以得到最优解,但是由于组合数目过多,优化问题的规模会非常庞大,导致计算过程收敛缓慢甚至无法收敛。文献[4-5]提出以潮流变化量对于移相角调节幅度的相对灵敏度为主要指标,筛选出合适的移相器装设点,这种基于灵敏度分析的选址方法简单可行,但是由于选址指标是非线性函数,在不同的状态点得到的灵敏度数值不同,而且难以解决实际电网中存在的多断面重载问题,因此存在一定的局限性。文献[6]基于线路有功潮流性能指数 PI,提出了更为具体的包含线路阻塞信息的灵敏度系数求解方法。文献[7]基于以上方法,提出先以受控线路潮流裕度为指

标筛选出待选线路,再以优化算法确定移相器的最佳装设点。这种方法结合了前两种方法的特点,在减小了计算量的基础上保证了选址结果的可靠性。

1.2 移相器的数量问题

对于单个潮流断面,移相器的安装数量基本上都预设为一台(双回线路一般为 2 台),只有当一台移相器无法满足需求时才考虑装设更多移相器。综合几种文献的选址方法以及移相器数量的选择方法,可以得到如下结论:

(1) 电网中只有一个潮流断面重载时,移相器的安装数量和候选位置较少,可以直接以调节灵敏度、成本等指标选出最终安装位置;

(2) 电网中有多断面重载时,需要安装多个移相器,适合先用多个指标筛选出待选线路,再用优化算法选出安装位置;

(3) 电网结构复杂、潮流断面不明确时,需要将移相器的位置和数量都作为决策变量,采用优化算法寻找最优解。

2 系统概述

2.1 电网间的联络线接线情况

B 网与外网的连接方式示意图如图 1 所示。

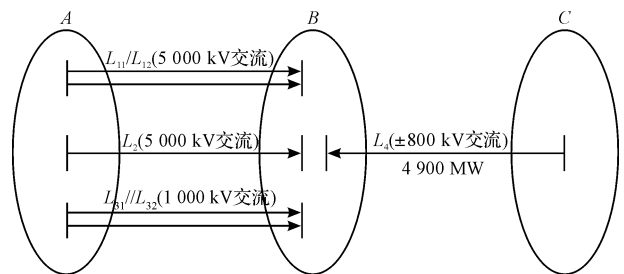


图 1 B 网与外网的连接方式示意图

L_{11}, L_{12} —两条 500 kV 双回线; L_2 —一条 500 kV 单回线; L_{31}, L_{32} —两条 1 000 kV 特高压交流双回线; L_4 —一条 ± 800 kV 特高压直流线路,正常工作情况下 C 网通过特高压直流线 L_4 向 B 网输送 4 900 MW 功率

B 网与外网主要通过 6 条线路相连接。

2.2 特高压直流双极闭锁时的联络线潮流

考虑到特高压直流线路 L_4 输送的 4 900 MW 功率约占 B 网总负荷的 22.3%,接近 B 网总负荷的四分之一,因此当 L_4 发生直流双极闭锁故障时,会使 B 网瞬间缺失大量的流入功率,从而导致 A 网和 B 网的 5 条交流联络线上负荷大大增加,潮流断面上的功率分布失衡,甚至导致某些线路严重过负荷。在 PSASP 中进行潮流计算的结果如表 1 所示。

表 1 未装设移相器时各联络线潮流

	$L_{31}, L_{32}/MW$	L_2/MW	$L_{11}, L_{12}/MW$
线路热稳极限	-	1 900	1 655 + 1 655
正常运行	1 552 × 2	1 519	1 013 + 977
故障后切负荷前	2 861 × 2	2 378	1 814 + 1 749
故障后初步切负荷	2 537 × 2	2 115	1 578 + 1 522
故障后再次切负荷	2 275 × 2	1 888	1 359 + 1 310

由表 1 可知,特高压直流线路双极闭锁后, L_{11} 、 L_{12} 、 L_2 这 3 条 500 kV 联络线的功率都超过了相应的热稳定极限。B 网在采取初步的紧急控制后,共切除了负荷 775 MW,增加发电机出力 366 MW,使 L_{11} 、 L_{12} 双回线路的功率下降到了其热稳定极限以下,但是此时 L_2 的功率仍然大于其热稳定极限。经过仿真计算,如果继续采用切负荷的措施使 L_2 单回线的功率低于其热稳定极限,需要再切除约 1 100 MW 负荷。而此时已经切除了 1 875 MW 的负荷,约占 B 网总负荷(约 22 000 MW)的 8.52%。根据国务院第 599 号令《电力安全事故应急处置和调查处理条例》,这已经达到了一般事故的标准,而这时其他交流联络线仍有较大的送电裕度。这反映了直流双极闭锁时联络线功率不平衡带来的 A、B 网之间潮流断面输电能力的浪费以及过多的切负荷。

3 具体问题中的移相器设计

3.1 移相器的选址和数量

在本研究提出的系统中,考虑到特高压直流 L_4 投入运行后,发生直流双极闭锁主要影响的是 A、B 网之间 3 条 500 kV 联络线和 2 条 1 000 kV 特高压交流线等输电断面的潮流,而移相器装设在输电断面以外的线路上对断面潮流的控制作用是间接的^[8],因此移相器的安装备选线路只考虑输电断面中的各条线路,即 3 条 500 kV 联络线和 2 条 1 000 kV 特高压交流线。

进一步的移相器选址综合考虑灵敏度等指标,对备选线路进行进一步的筛选和评估。对 5 条候选线路进行灵敏度分析和成本评估后,可以发现在 500 kV 单回线 L_2 上安装移相器不但能使潮流转移量对移相角的灵敏度最高,并且只需装设一台移相器。而其他的候选线路不但调节潮流的效果较差,移相器设计容量大,而且都是双回线路,需要装设两台移相器才能保证潮流平衡。考虑到装设移相器的主要目的是改善特高压直流故障时 B 网的稳定性,将该移相器安装在 500 kV 单回线 L_2 靠近 B 网的一侧。

3.2 移相器的选型

现在实际应用的移相器主要分为机械式移相器和基于晶闸管控制的静止移相器(TCPST)。机械式移相器造价较低,但是由于调节速度慢无法参与到系统暂态稳定控制中,并且日常维护工作量大;静止移相器调

节速度快,能够在系统暂态稳定控制中发挥作用。但在总体造价方面,静止移相器总体造价要远高于机械式移相器。

在 B 网装设的移相器最好采用能够提高系统暂态稳定性的静止移相器,保证移相器参与紧急控制时的可靠性,同时也能减少移相器日常维护的工作量。

考虑到装设的移相器不能改变输入电压的幅值大小,因此在选择具体的移相器结构时,本研究采用了较典型的双芯对称型分级投切式 TCPST,其主要组成部分是一个串联变压器 BT 和一个并联变压器 ET(又称励磁变压器)。如果单位绕组产生的注入电压为 E,那么晶闸管调压电路则可输出 $-13E \sim 13E$ 共 27 个等级的电压值,即移相角可以设置 27 个档位。具体的移相器拓扑结构如图 2 所示。

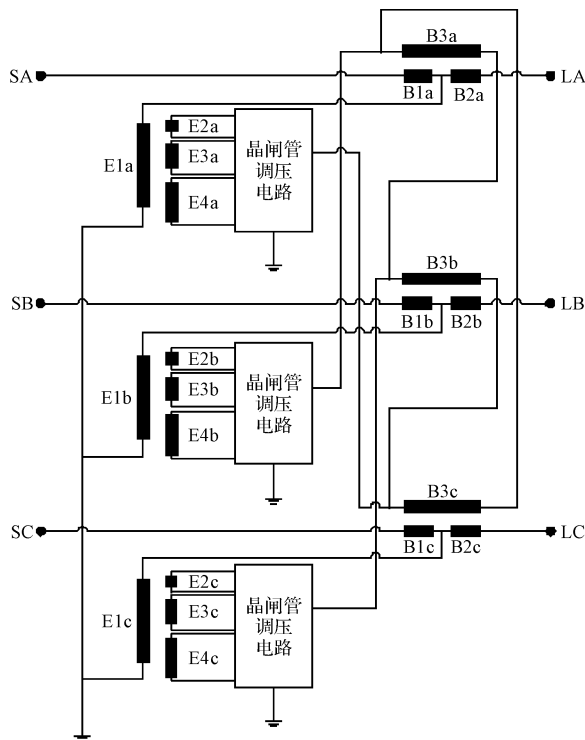


图 2 双芯对称型分级投切 TCPST 的拓扑结构

3.3 移相器的参数设计和计算

考虑到 500 kV 单回线 L_2 的热稳定极限是 1 900 MW,出现直流双极闭锁故障时的潮流可能超出该数值。本研究采用的移相器的主要技术参数如表 2 所示。

表 2 TCPST 的主要技术参数

参数名称	数值
额定电压/kV	525
额定电流/A	3 000
三相穿越功率/MVA	2 728
调节级数	± 13 级
额定相角调节范围(°)	± 10
串联变压器短路阻抗/%	11
并联变压器短路阻抗/%	14

又由串联变压器短路阻抗、并联变压器短路阻抗和额定最大移相角可得移相器的空载最大移相角,如下式所示:

$$(1 - X_T)(1 - X_B) = \tan \frac{\alpha}{2} / \tan \frac{\beta}{2} \quad (1)$$

式中: X_T —并联变压器的短路阻抗, $X_T = 0.14$; X_B —串联变压器的短路阻抗, $X_B = 0.11$; α —额定最大相角, $\alpha = 10^\circ$,可得空载最大移相角 $\beta = 13.04^\circ$ 。

又由线路输入功率和移相器空载最大移相角,可得串、并联变压器容量,如下式所示:

$$S_{\text{并}} = S_{\text{串}} = S_{\text{入}} \sin\beta \quad (2)$$

由 $S_{\text{入}} = 2\,728\text{ MW}$ 可得: $S_{\text{并}} = S_{\text{串}} = 615\text{ MW} = 3 \times 205\text{ MW}$ 。

由上述推导过程可知组成移相器的串、并联变压器的容量远小于移相器所在线路的穿越功率,并与串、并联变压器的短路阻抗密切相关。在移相器安装线路和额定最大移相角一定时,串、并联变压器的短路阻抗越小,串、并联变压器的设计容量越小。

在计及移相器各绕组的漏抗时,移相器的结构如图 3 所示^[9]。

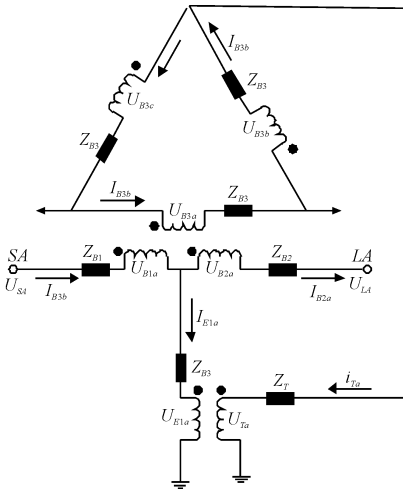


图 3 计及绕组漏抗时的移相器结构示意图(A相)

经过计算和推导,可得移相器两端电压关系,如下式所示:

$$\dot{U}_L = (\dot{U}_S - I_S Z_{eq}) e^{j\varphi} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,移相器可等效为一个理想变压器(变比的模为 1,相角为 φ) 和一个等值阻抗 Z_{eq} 串联的结构,以便于在 PSASP 中建立移相器模型并进行仿真。等效后的移相器模型如图 4 所示。

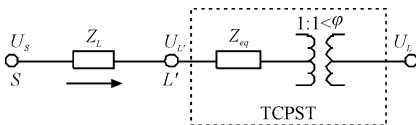


图 4 计及绕组漏抗时可控移相器等效电路图

由图 2,图 3 中的模型可推导出等值阻抗 Z_{eq} 与各绕组漏抗、串并联变压器变比的关系。因为移相器调节

移相角是通过改变并联变压器的变比 n_T 来实现的,因此不同组态下,移相器等值阻抗 Z_{eq} 是不同的。忽略移相器电阻,仅考虑漏抗,得到移相器在不同移相角下的等值阻抗,如表 3 所示。

表 3 移相器等效模型不同移相角下的等值阻抗

空载移相角 / ($^\circ$)	等值阻抗 / Ω	等值阻抗 / p. u
0	4.580 511	0.001 662
± 1	4.756 805	0.001 726
± 2	4.941 722	0.001 793
± 3	5.135 169	0.001 863
± 4	5.337 048	0.001 936
± 5	5.547 250	0.002 013
± 6	5.765 661	0.002 092
± 7	5.992 160	0.002 174
± 8	6.226 618	0.002 259
± 9	6.468 898	0.002 347
± 10	6.718 860	0.002 438
± 11	6.976 354	0.002 531
± 12	7.241 226	0.002 627
± 13	7.513 316	0.002 726

4 装设移相器后的仿真分析

在初步的紧急控制后(切除负荷 775 MW,增加发电机出力 366 MW),可以通过移相器来调节联络线的潮流,使过载的 500 kV 单回线 L_2 上的部分功率转移到其他联络线上,而不需要进一步的切负荷。

4.1 PSASP 仿真结果

装设移相器后不同移相角时的各联络线潮流如表 4 所示。

表 4 装设移相器后不同移相角时的各联络线潮流

空载移相角 / $^\circ$	$L_{11}, L_{12} / \text{MW}$	L_2 / MW	$L_{31}, L_{32} / \text{MW}$
无移相器	1 578 + 1 522	2 115	2537 \times 2
0	1 602 + 1 544	2 028	2 556 \times 2
1	1 608 + 1 551	2 004	2 562 \times 2
2	1 616 + 1 557	1 978	2 567 \times 2
3	1 623 + 1 565	1 950	2 574 \times 2
4	1 632 + 1 573	1 919	2 580 \times 2
5	1 640 + 1 582	1 887	2 587 \times 2
6	1 650 + 1 591	1 853	2 595 \times 2
7	1 660 + 1 600	1 816	2 603 \times 2
8	1 671 + 1 611	1 777	2 612 \times 2

本研究在单回线 L_2 的 B 网一侧装设 500 kV 移相器后,随着移相器的移相角增大,单回线 L_2 的功率逐渐下降。在移相角为 5° 时,单回线 L_2 的功率已经下降到 1 887 MW,低于其热稳定极限(1 900 MW)。在移相角为 6° 时,单回线 L_2 的功率为 1 853 MW,得到进一步降低,而双回线 L_{11}, L_{12} 的功率已经接近其热稳定极限(1 655 MW)。进一步加大移相角到 7° 时,单回线 L_2 的功率已经下降到 1 750 MW,显著低于其热稳定极限,但是此时双回线 L_{11}, L_{12} 中的 L_{11} 已经略微超过热稳定极限。因此,将移相器的移相角设置为 5° 时,能够达到

直流故障后最佳的潮流控制效果。

将各线路潮流变化绘成折线图,可以清晰地看出安装移相器后,随着移相角的增大,各线路潮流的变化趋势以及 L_{11} 、 L_{12} 、 L_2 这 3 条 500 kV 联络线是否超过热稳定极限,该变化趋势图如图 5 所示。

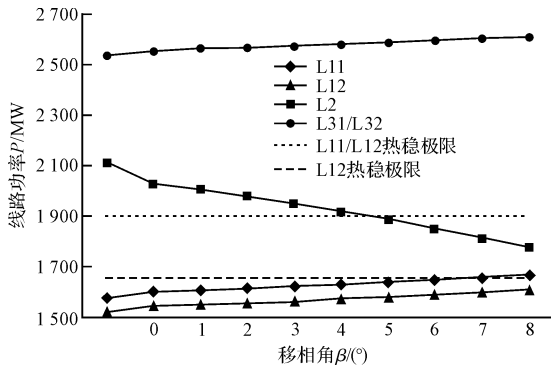


图 5 联络线潮流随移相角变化趋势图
“-”——未装设移相器时的线路潮流情况

4.2 仿真结果分析

从表 4 和图 5 中可以看出,通过在 L_2 线路的 B 网一侧安装移相器,可以使直流双极闭锁故障后 L_2 上的功率部分转移到潮流断面上的其他联络线上,使各条线路的功率都低于热稳定极限。由此可知,安装移相器后,B 网在直流双极闭锁故障时,只需切除少量负荷就能维持各线路稳定运行,充分利用了输电断面的送电能力,提高了特高压直流线路双极闭锁后系统的稳定性。

从图 5 中还可以看出,在装设移相器后,即使移相角为 0° 时移相器仍起到了控制潮流转移的作用。这是由于移相器内部存在等值阻抗,会使得实际移相角与设定的移相角存在差异。在不同情况下,移相器等值阻抗对移相角的影响也是不同的,既有可能对移相起正作用,也有可能起负作用。在 L_2 线路的 B 网一侧安装移相器时,显然等值阻抗起到了正作用,即实际移相角大于设定的移相角。在仿真中还可以发现移相器的等值阻抗大小对移相结果有着很大的影响,移相器的等值阻抗越大,实际移相角和设定移相角的差距就越大。因此上一节中对于移相器在各个移相角时的等值阻抗的计算是很有必要的。

从之前得到的结论中可知,组成移相器的串、并联变压器的短路阻抗越小,串、并联变压器的容量就越小,

而短路阻抗直接决定了移相器的等值阻抗大小。换句话说,移相器的等值阻抗越小,移相器的设计容量就越小。除此之外,移相器的阻抗决定了移相器的损耗,对线路短路电流也有一定影响。因此,在移相器的参数设计时,阻抗的计算和选择是一个非常重要的因素。

5 结束语

从 PSASP 的仿真结果可知,在电网的合适位置装设移相器能有效地改善特高压直流双极闭锁故障时出现的联络线功率不平衡问题,避免了某条线路负荷过重而切除过多负荷,充分利用了输电断面的传输能力,并保证了联络线的安全稳定运行,提高了电网在接入特高压直流线路后的稳定性与可靠性。

在移相器的设计和选择时,应该将移相器的阻抗作为一个重要参数加以考虑。在实际电网中安装移相器,需要考虑移相器动态调节移相角的过程中晶闸管换相对线路、电网稳定性的影响。

参考文献 (References):

- [1] 方新春,邝建荣,杜 巍. 南方电网直流输电系统双极闭锁事故分析[J]. 华北电力大学学报:自然科学版,2013,40(6):51-56.
- [2] 倪尚谦. 特高压静止移相器的基本设计与电磁暂态研究[D]. 北京:中国电力科学研究院,2013.
- [3] PATERNI P, VITET S, BENA M, et al. Optimal location of phase shifters in the French network by genetic algorithm[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1999, 14(1):37-42.
- [4] 郝 帅,高沁翔,伏松平,等. 合理利用线路的移相变压器选址问题研究[J]. 微计算机信息,2009,25(8):305-306.
- [5] 曲祖义,廖华兴,于继来,等. 消除线路过载现象的移相变压器选址问题研究[J]. 电网技术,2002,26(12):30-32.
- [6] 彭 涛. 一种新型晶闸管控制移相器建模及其应用[D]. 北京:华北电力大学(北京)电气与电子工程学院,2009.
- [7] 孙文多. 基于自适应遗传算法的移相器优化计算[J]. 机电工程,2011,28(7):901-904.
- [8] 崔 勇,陈洁羽,刘 俊. 提高输电断面传输能力的可控移相器最优选址算法研究[J]. 陕西电力,2013,41(11):75-79.
- [9] 周 飞,于弘洋,方万良,等. 分级投切可控移相器稳态相量建模与分析[J]. 电网技术,2013,37(11):3184-3189.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

张仲驰,童伟林,王建全. 移相变压器在特高压直流双极闭锁故障中的应用[J]. 机电工程,2016,33(12):1496-1500.

ZHANG Zhong-chi, TONG Wei-lin, WANG Jian-quan. Application of phase-shifting transformers in UHVDC transmission system under bipolar block faults [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(12):1496-1500. 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>