



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109617112 B

(45)授权公告日 2020.09.18

(21)申请号 201811535295.7

H02J 1/10(2006.01)

(22)申请日 2018.12.14

(56)对比文件

(65)同一申请的已公布的文献号

CN 103414179 A,2013.11.27

申请公布号 CN 109617112 A

CN 107800130 A,2018.03.13

CN 105244902 A,2016.01.13

(43)申请公布日 2019.04.12

CN 105119316 A,2015.12.02

(73)专利权人 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院

WO 2017077045 A1,2017.05.11

He Wang等.DC voltage control strategy research in multi-terminal HVDC system based on optimal AC/DC power flow.《2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)》.2016,第1948-1952页.

地址 210008 江苏省南京市中山路251号

专利权人 国家电网有限公司

国网江苏省电力有限公司

(72)发明人 蔡晖 谢珍建 徐政 张哲任

黄俊辉 祁万春 韩杏宁 刘柏良

李梅航等.适用于多端柔性直流输电系统的快速电压裕度控制策略.《电网技术》.2016,第40卷(第10期),第3045-3051页.

(74)专利代理机构 杭州天勤知识产权代理有限公司 33224

代理人 王琛

审查员 杨艳华

(51)Int.Cl.

H02J 3/36(2006.01)

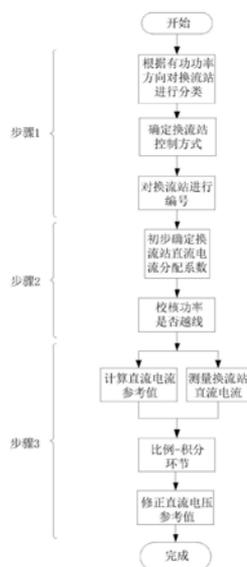
权利要求书2页 说明书6页 附图2页

(54)发明名称

适用于多端柔性直流系统的改进型直流电压控制策略

(57)摘要

本发明公开了一种适用于多端柔性直流系统的改进型直流电压控制策略,包括:(1)根据所有工况下换流站有功功率的反向确定换流站类型,根据换流站类型确定换流站的控制方式并对换流站进行编号;(2)对于采用定直流电压控制的受端换流站,确定各个换流站之间的直流电流的分配系数;(3)对换流站直流电压的指令值进行修正,实现对定直流电压换流站的直流电流分配控制。本发明通过在定直流电压的换流站中增加直流电压指令值修正环节,可以实现换流站直流电流和有功功率的间接控制,能够解决主从控制可靠性不高的问题,也能解决直流电压下垂控制中功率不能灵活控制的问题,在实际的工程意义重大。



1. 一种适用于多端柔性直流系统的改进型直流电压控制策略,包括如下步骤:

(1) 将多端柔性直流系统中各换流站划分为送端换流站和受端换流站,分别对送端换流站和受端换流站指定相应的控制方式,并对所有换流站进行编号;

(2) 对于目标换流站,确定这些换流站的直流电流分配系数;所述目标换流站即为采用定直流电压+定无功功率控制方式的受端换流站;

(3) 利用直流电流及其分配系数对目标换流站的直流电压指令值进行修正,依据修正后的直流电压指令值采用定直流电压+定无功功率控制方式对目标换流站加以控制;对目标换流站的直流电压指令值进行修正,具体过程如下:

3.1 对于系统中的第*i*个目标换流站,根据以下公式计算该目标换流站的直流电流指令值 I_{dcrefi} :

$$I_{dcrefi} = K_i \sum_{i=1}^{N_1} I_{dci}$$

其中: K_i 为系统中第*i*个目标换流站的直流电流分配系数, I_{dci} 为系统中第*i*个目标换流站的直流电流, N_1 为系统中目标换流站的数量且 $1 \leq N_1 \leq N$, N 为系统中受端换流站的数量;

3.2 将第*i*个目标换流站的直流电流 I_{dci} 减去直流电流指令值 I_{dcrefi} ,得到对应的电流误差值;

3.3 使该电流误差值依次经PI控制以及限幅环节后得到的输出结果即为第*i*个目标换流站的直流电压修正量,将第*i*个目标换流站原直流电压指令值加上该修正量即得到修正后的直流电压指令值。

2. 根据权利要求1所述的改进型直流电压控制策略,其特征在于:所述步骤(1)中将系统中各换流站划分为送端换流站和受端换流站,具体标准为:对于系统中的任一换流站,若该换流站在所有工况下总是向交流系统注入有功功率,则将该换流站归为受端换流站,否则将该换流站归为送端换流站。

3. 根据权利要求1所述的改进型直流电压控制策略,其特征在于:所述步骤(1)中分别对送端换流站和受端换流站指定相应的控制方式,具体标准为:对于受端换流站,使其采用定直流电压+定无功功率控制方式或采用定有功功率+定无功功率控制方式;对于送端换流站,若其交流侧连接到无源网络,则使其采用定交流电压+定频率控制方式,若其交流侧连接到有源网络,则使其采用定有功功率+定无功功率控制方式。

4. 根据权利要求1所述的改进型直流电压控制策略,其特征在于:所述步骤(1)中对所有换流站进行编号的具体标准为:采用受端换流站在前送端换流站在后的顺序对系统中每个换流站进行编号,受端换流站中则先对采用定直流电压+定无功功率控制方式的受端换流站进行编号。

5. 根据权利要求1所述的改进型直流电压控制策略,其特征在于:所述步骤(2)中根据人工经验在以下约束条件下对目标换流站的直流电流分配系数进行设定;

$$U_{dci} K_i \sum_{i=1}^{N_1} I_{dci} \leq S_i$$

其中: K_i 为系统中第*i*个目标换流站的直流电流分配系数, U_{dci} 和 I_{dci} 分别为系统中第*i*个

目标换流站的直流电压和直流电流, S_i 为系统中第 i 个目标换流站的额定容量, N_1 为系统中目标换流站的数量且 $1 \leq N_1 \leq N$, N 为系统中受端换流站的数量。

6. 根据权利要求1所述的改进型直流电压控制策略, 其特征在于: 所述步骤(2)中根据以下公式计算确定目标换流站的直流电流分配系数:

$$K_i = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^{N_1} S_i}$$

其中: K_i 为系统中第 i 个目标换流站的直流电流分配系数, S_i 为系统中第 i 个目标换流站的额定容量, N_1 为系统中目标换流站的数量且 $1 \leq N_1 \leq N$, N 为系统中受端换流站的数量。

7. 根据权利要求1所述的改进型直流电压控制策略, 其特征在于: 所述PI控制环节的积分时间常数设定为0.2, 比例系数设定为0.05, 限幅环节的最大输出和最小输出分别设定为0.05p.u.和-0.05p.u.。

适用于多端柔性直流系统的改进型直流电压控制策略

技术领域

[0001] 本发明属于电力系统输配电技术领域,具体涉及一种适用于多端柔性直流系统的改进型直流电压控制策略。

背景技术

[0002] 我国能源资源与负荷需求逆向分布,远距离大容量特高压直流输电正得到快速发展;大规模常规直流输电的应用满足了送端地区能源送出和受端地区负荷增长的需求,但也给电网安全运行与清洁能源消纳带来了显著影响,主要是因为严重交流故障可能引起常规直流多次换相失败甚至直流闭锁。此外,常规直流在电网故障的快速动态过程中吸收的无功功率大幅增加,导致电网局部动态无功补偿能力不足、电压失稳风险大幅增加。

[0003] 随着电力电子技术的发展,基于模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的柔性直流输电技术最近几年呈现出巨大的发展潜力;模块化多电平换流器采用了具备主动开通和关断能力半导体器件,无须借助于电网进行换相,可以实现有功功率和无功功率的解耦控制,并为交流电网提供电压支撑,从根本上解决了常规直流输电技术存在的换相失败、无法接入弱交流系统等技术缺陷,得到了学术界和工业界的广泛关注。

[0004] 自从上海南汇工程投运以来,柔性直流输电技术已表现出巨大的发展潜力和应用前景。到目前为止,国内已有多个基于模块化多电平换流器的高压直流输电系统投入运行,如国内的舟山五端工程、南澳三端工程、鲁西背靠背工程和厦门工程等,另外还有乌东德三端系统和张北四端工程在建;可以预见柔性直流输电技术将成为高压直流输电技术的发展方向。

[0005] 相比起常规直流输电技术,基于MMC的柔性直流输电技术目前存在的最大问题是额定直流电流水平较低;相比起常规直流输电系统的最大可以达到6kA左右的额定直流电流,柔性直流系统的最大额定直流电流只能达到3kA左右。因此,目前一个较为合适的方案是采用多端柔性直流系统,特别是对于受端系统而言的意义巨大,不但可以解决受端MMC换流站与整流站的功率匹配问题,还可以实现功率的分散接入,降低交流系统故障时的功率冲击。

[0006] 现有已投运的多端柔性直流系统中基本采用主从控制策略。在正常的运行模式下,主换流站控制直流系统的直流电压以维持直流系统的直流电压稳定;当主换流站由于故障而退出运行的时候,系统失去维持功率平衡的换流站,此时直流系统的直流电压无法实现稳定。主从控制策略的优点是简单清晰,但是由于只有一个换流站定直流电压,可靠性较低,当定直流电压的换流站发生故障后可能会影响到整个直流系统的正常运行。

[0007] 到目前为止,已公开的绝大多数文献基本集中在多端柔性直流系统中直流电压下垂控制策略的研究,直流电压下垂控制策略的本质是利用多个换流站承担起控制直流电压的作用,可以不依赖于通信系统,非常适合于在多端柔性直流系统中使用。但是,直流电压下垂控制器对直流网络功率平衡的控制是开环的,因此系统的稳定运行点对各个换流站控

制器参数非常敏感,此外还存在相应换流站有功功率分配不可控的问题。

发明内容

[0008] 鉴于上述,本发明提供了一种适用于多端柔性直流系统的改进型直流电压控制策略,该方法物理意义明确,适用性强,在工程设计中有较大的使用价值。

[0009] 一种适用于多端柔性直流系统的改进型直流电压控制策略,包括如下步骤:

[0010] (1) 将多端柔性直流系统中各换流站划分为送端换流站和受端换流站,分别对送端换流站和受端换流站指定相应的控制方式,并对所有换流站进行编号;

[0011] (2) 对于目标换流站,确定这些换流站的直流电流分配系数;所述目标换流站即为采用定直流电压+定无功功率控制方式的受端换流站;

[0012] (3) 利用直流电流及其分配系数对目标换流站的直流电压指令值进行修正,依据修正后的直流电压指令值采用定直流电压+定无功功率控制方式对目标换流站加以控制。

[0013] 进一步地,所述步骤(1)中将系统中各换流站划分为送端换流站和受端换流站,具体标准为:对于系统中的任一换流站,若该换流站在所有工况下总是向交流系统注入有功功率,则将该换流站归为受端换流站,否则将该换流站归为送端换流站。

[0014] 进一步地,所述步骤(1)中分别对送端换流站和受端换流站指定相应的控制方式,具体标准为:对于受端换流站,使其采用定直流电压+定无功功率控制方式或采用定有功功率+定无功功率控制方式;对于送端换流站,若其交流侧连接到无源网络(不含有发电机的交流系统),则使其采用定交流电压+定频率控制方式,若其交流侧连接到有源网络(含有发电机的交流系统),则使其采用定有功功率+定无功功率控制方式。

[0015] 进一步地,所述步骤(1)中对所有换流站进行编号的具体标准为:采用受端换流站在前送端换流站在后的顺序对系统中每个换流站进行编号,受端换流站中则先对采用定直流电压+定无功功率控制方式的受端换流站进行编号。

[0016] 进一步地,所述步骤(2)中根据人工经验在以下约束条件下对目标换流站的直流电流分配系数进行设定;

$$[0017] \quad U_{dci} K_i \sum_{i=1}^{N_1} I_{dci} \leq S_i$$

[0018] 其中: K_i 为系统中第*i*个目标换流站的直流电流分配系数, U_{dci} 和 I_{dci} 分别为系统中第*i*个目标换流站的直流电压和直流电流, S_i 为系统中第*i*个目标换流站的额定容量, N_1 为系统中目标换流站的数量且 $1 \leq N_1 \leq N$, N 为系统中受端换流站的数量。

[0019] 进一步地,所述步骤(2)中根据以下公式计算确定目标换流站的直流电流分配系数;

$$[0020] \quad K_i = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^{N_1} S_i}$$

[0021] 其中: K_i 为系统中第*i*个目标换流站的直流电流分配系数, S_i 为系统中第*i*个目标换流站的额定容量, N_1 为系统中目标换流站的数量且 $1 \leq N_1 \leq N$, N 为系统中受端换流站的数量。

[0022] 进一步地,所述步骤(3)中对目标换流站的直流电压指令值进行修正,具体过程如

下:

[0023] 3.1对于系统中的第*i*个目标换流站,根据以下公式计算该目标换流站的直流电流指令值 I_{dcrefi} :

$$[0024] \quad I_{dcrefi} = K_i \sum_{i=1}^{N_i} I_{dci}$$

[0025] 其中: K_i 为系统中第*i*个目标换流站的直流电流分配系数, I_{dci} 为系统中第*i*个目标换流站的直流电流, N_i 为系统中目标换流站的数量且 $1 \leq N_i \leq N$, N 为系统中受端换流站的数量;

[0026] 3.2将第*i*个目标换流站的直流电流 I_{dci} 减去直流电流指令值 I_{dcrefi} ,得到对应的电流误差值;

[0027] 3.3使该电流误差值依次经PI(比例-积分)控制以及限幅环节后得到的输出结果即为第*i*个目标换流站的直流电压修正量,将第*i*个目标换流站原直流电压指令值(即该换流站的额定直流电压)加上该修正量即得到修正后的直流电压指令值。

[0028] 优选地,所述PI控制环节的积分时间常数设定为0.2,比例系数设定为0.05,限幅环节的最大输出和最小输出分别设定为0.05p.u.和-0.05p.u.(标么值)。

[0029] 基于上述技术方案,本发明具有以下有益技术效果:

[0030] (1)针对多端柔性直流系统,本发明提出了一种改进型直流电压控制策略,该方法可以实现多个换流站同时控制直流电压的功能,可以为未来工程的设计起到一定的指导作用。

[0031] (2)本发明通过在定直流电压的换流站中增加直流电压指令值修正环节,可以实现换流站直流电流和有功功率的间接控制。

[0032] 相比起传统的主从控制策略,本发明方法可以提高直流系统的可靠性;相对于传统的直流电压下垂控制,本发明方法能够实现定直流电压换流站之间有功功率分配的灵活控制,实际的工程意义重大。

附图说明

[0033] 图1为本发明实施例中多端柔性直流系统的结构示意图。

[0034] 图2为本发明控制方法的步骤流程示意图。

[0035] 图3为本发明中换流站直流电压指令值的计算原理框图。

[0036] 图4为使用本发明方法仿真所得的换流站直流电流波形示意图。

具体实施方式

[0037] 为了更为具体地描述本发明,下面结合附图及具体实施方式对本发明的技术方案进行详细说明。

[0038] 如图2所示,本发明适用于多端柔性直流系统的改进型直流电压控制策略,包括如下步骤:

[0039] (1)根据多端柔性直流系统中各个换流站在各种工况下的直流功率水平,将换流站划分为送端换流站和受端换流站,分别对送端换流站和受端换流站指定相应的控制方式,然后对所有换流站按照一定的规律进行编号。

[0040] 假设多端柔性直流系统包含M个换流站,首先根据所有工况下换流站有功功率的方向将其划分为送端换流站或受端换流站:如果换流站总是向交流系统注入有功功率,那么该换流站为受端换流站,否则将其划分为送端换流站。假设分类之后整个直流系统中有N个受端换流站,对于受端换流站而言,可以采用两种控制方式:定直流电压+定无功功率(定交流电压幅值)和定有功功率+定无功功率(定交流电压幅值);对于送端换流站而言,如果连接到无源孤岛,那么只能采用定交流电压+定频率的控制方式,如果连接到有源网络,可以采用定有功功率+定无功功率(定交流电压幅值)的控制方式。假设受端换流站中共有 N_1 ($1 \leq N_1 \leq N$)个换流站采用定直流电压+定无功功率(定交流电压幅值)的控制方式,按照先受端换流站后送端换流站且定直流电压换流站在先的顺序对每个换流站分别编号(换流站编号为1~M)。

[0041] (2)对于采用定直流电压控制的受端换流站,确定各个换流站之间的直流电流的分配系数。

[0042] 假设 N_1 个采用定直流电压+定无功功率(定交流电压幅值)的受端换流站额定容量分别为 $S_1 \sim S_{N_1}$,定义电流分配系数 K_i ($i = 1 \sim N_1$)如下所示:

$$[0043] \quad K_i = \frac{I_{dci}}{\sum_{i=1}^{N_1} I_{dci}}$$

[0044] 其中: I_{dci} 为换流站 i ($1 \leq i \leq N_1$)的直流电流测量值, K_i 需要根据实际需求进行初步选择。通常情况下,可以将电流分配系数 K_i 的值取为 K_{i0} :

$$[0045] \quad K_{i0} = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^{N_1} S_i}$$

[0046] 在初步选择 K_i 之后,并且必须要校核是否满足换流站直流功率不越限的条件;假设换流站换流站 i ($1 \leq i \leq N_1$)的直流电压为 U_{dci} ,上述条件具体可以写为:

$$[0047] \quad U_{dci} K_{i0} \sum_{i=1}^{N_1} I_{dci} \leq S_i$$

[0048] (3)基于采用定直流电压控制的受端换流站中的实测直流电流及其分配系数,对换流站直流电压的指令值进行修正,实现对定直流电压换流站的直流电流分配控制。

[0049] 对于换流站 i ($1 \leq i \leq N_1$)的直流电压指令值的修正方法如图3所示:

[0050] 3.1利用步骤(2)确定的换流站电流分配系数 K_i ,基于换流站1~ N_1 的直流电流测量

值计算换流站直流电流的指令值 $I_{dcrefi} = K_i \sum_{i=1}^{N_1} I_{dci}$ 。

[0051] 3.2将换流站的直流电流测量值 I_{dci} 与直流电流指令值 I_{dcrefi} 做差,作为PI控制器的输入信号;比例-积分环节中积分时间常数可以取在0.2附近,比例系数可以取在0.05附近,比例-积分环节的最大输出和最小输出可以限制在0.05p.u.和-0.05p.u.附近。

[0052] 3.3将上述比例-积分控制器的输出信号 ΔU_{dcrefi} 作为换流站直流电压指令值的修正量,与换流站直流电压的初始指令值 U_{dc0i} 相加,作为换流站直流电压指令值 U_{dcrefi} , U_{dc0i} 取

为换流站额定直流电压。

[0053] 本实施方式中四端柔性直流输电系统的结构如图1所示,其中换流站1和换流站2作为受端换流站,换流站3和换流站4作为送端换流站,四端柔性直流输电系统参数如表1所示:

[0054] 表1

[0055]	项目	大小	备注
换流站 1 和换流站 3			
	交流系统额定电压	220 kV	线电压有效值
	换流变变比	220kV/255kV	Y ₀ /Δ
	换流变漏抗	3.45 mH	0.15 p.u.
	每个桥臂上子模块数	250	
	子模块电容	10000 μF	
	桥臂电抗	63.3 mH	
	平波电抗	0.2 H	
	子模块电容额定电压	2 kV	额定值
	换流站额定容量	750 MW	
换流站 2 和换流站 4			
[0056]	交流系统额定电压	220 kV	线电压有效值
	换流变变比	220kV/255kV	Y ₀ /Δ
	换流变漏抗	1.725 mH	0.15 p.u.
	每个桥臂上子模块数	250	
	子模块电容	20000 μF	
	桥臂电抗	31.66 mH	
	平波电抗	0.2 H	
	子模块电容额定电压	2 kV	额定值
	换流站额定容量	1500 MW	
直流线路			
	直流电压	±500 kV	
	直流线路 12 长度	250 km	
	直流线路 13 长度	200 km	
	直流线路 24 长度	250 km	
	直流线路 34 长度	50 km	

[0057] 本实施方式通过以下步骤对直流系统进行控制:

[0058] (1) 首先根据各种典型工况下各个换流站的有功功率方向,将换流站划分为送端换流站和受端换流站。假设实施算例中在各种典型的工况下,换流站1和换流站2的有功功率方向都是由换流站注入交流系统,因此换流站1和换流站2是受端换流站,换流站3和换流站4是送端换流站。由于四个换流站都连接到有源交流系统,因此令换流站3和换流站4分别采用定有功功率+定无功功率控制策略,换流站1和换流站2分别采用定直流电压+定无功功率控制策略。图1中各个换流站的编号已满足要求,因此不需要对换流站编号进行调整。

[0059] (2) 根据换流站1和换流站2的额定容量,分别计算换流站1和换流站2电流分配系数的初始值 K_{10} 和 K_{20} 分别为0.3333和0.6667;通常情况下,可以将换流站1和换流站2的电流分配系数 K_1 和 K_2 应该在初始值附近。

[0060] 以有功功率从换流站注入交流系统为正方向,考虑换流站3和换流站4的有功功率指令值分别为 -0.3p.u. (基准值为750MW)和 -0.5p.u. (基准值为1500MW)的工况,仿真中考虑两组 (K_1, K_2) 分别为 $(0.3333, 0.6667)$ 和 $(0.0, 1.0)$ 的情况。由于直流线路损耗的存在,显然在 (K_1, K_2) 分别取为 $(0.3333, 0.6667)$ 和 $(0.0, 1.0)$ 时,换流站1和换流站2都能满足换流站直流功率不越限的条件。

[0061] (3) 将换流站1和换流站2的直流电流测量值 I_{dc1} 和 I_{dc2} 相加,分别乘以分配系数 K_1 和 K_2 就可以得到换流站1和换流站2的直流电流指令值 I_{dcref1} 和 I_{dcref2} 。

[0062] 对于换流站1而言,需要用直流电流测量值 I_{dc1} 减去直流电流指令值 I_{dcref1} ,所得结果作为换流站1中比例-积分控制环节的输入;比例-积分控制环节的输出 ΔU_{dcref1} 与换流站1直流电压的初始指令值 U_{dc01} 相加,作为换流站1的直流电压指令值 U_{dcref1} 。

[0063] 对于换流站2而言,需要用直流电流测量值 I_{dc2} 减去直流电流指令值 I_{dcref2} ,所得结果作为换流站2中比例-积分控制环节的输入;比例-积分控制环节的输出 ΔU_{dcref1} 与换流站2直流电压的初始指令值 U_{dc02} 相加,作为换流站2的直流电压指令值 U_{dcref2} 。

[0064] 图4给出了 (K_1, K_2) 从 $(0.3333, 0.6667)$ 阶跃为 $(0.0, 1.0)$ 时换流站1~换流站4直流电流波形的仿真结果。从仿真结果中可以发现,当电流分配系数 (K_1, K_2) 为 $(0.3333, 0.6667)$ 时,换流站1和换流站2的直流电流能够稳定保持在0.67kA和1.33kA附近;当电流分配系数 (K_1, K_2) 变为 $(0.0, 1.0)$ 时,换流站1和换流站2的直流电流能够稳定保持在0kA和2kA附近;因此仿真结果证明了本发明的有效性。

[0065] 上述对实施例的描述是为便于本技术领域的普通技术人员能理解和应用本发明。熟悉本领域技术的人员显然可以容易地对上述实施例做出各种修改,并把在此说明的一般原理应用到其他实施例中而不必经过创造性的劳动。因此,本发明不限于上述实施例,本领域技术人员根据本发明的揭示,对于本发明做出的改进和修改都应该在本发明的保护范围之内。

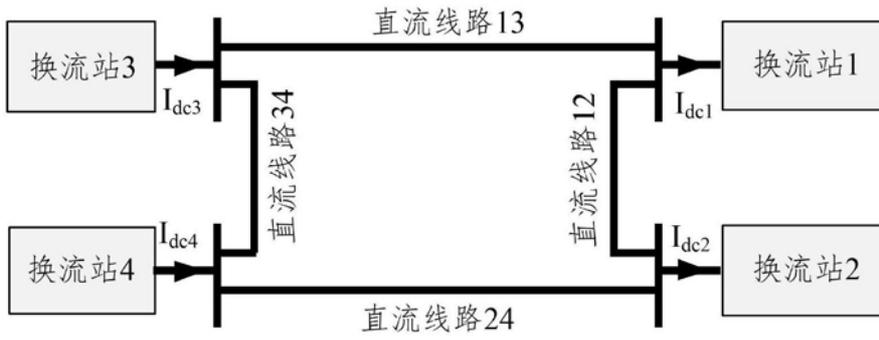


图1

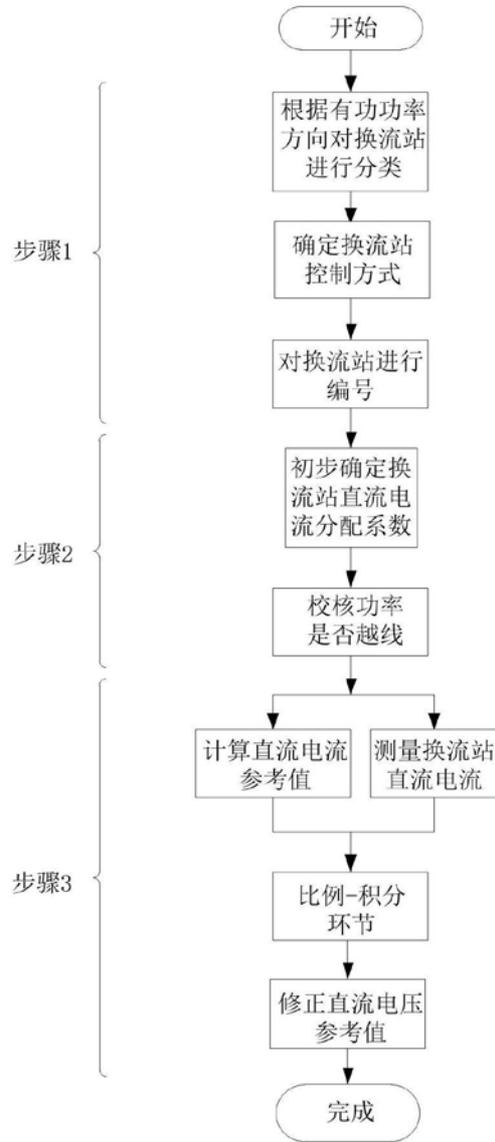


图2

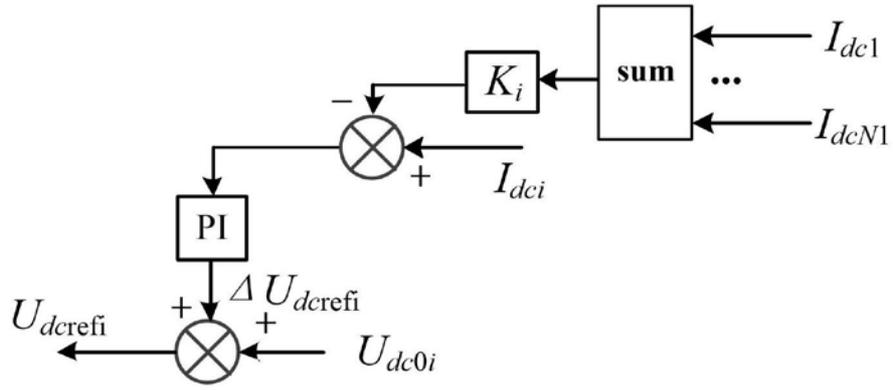


图3

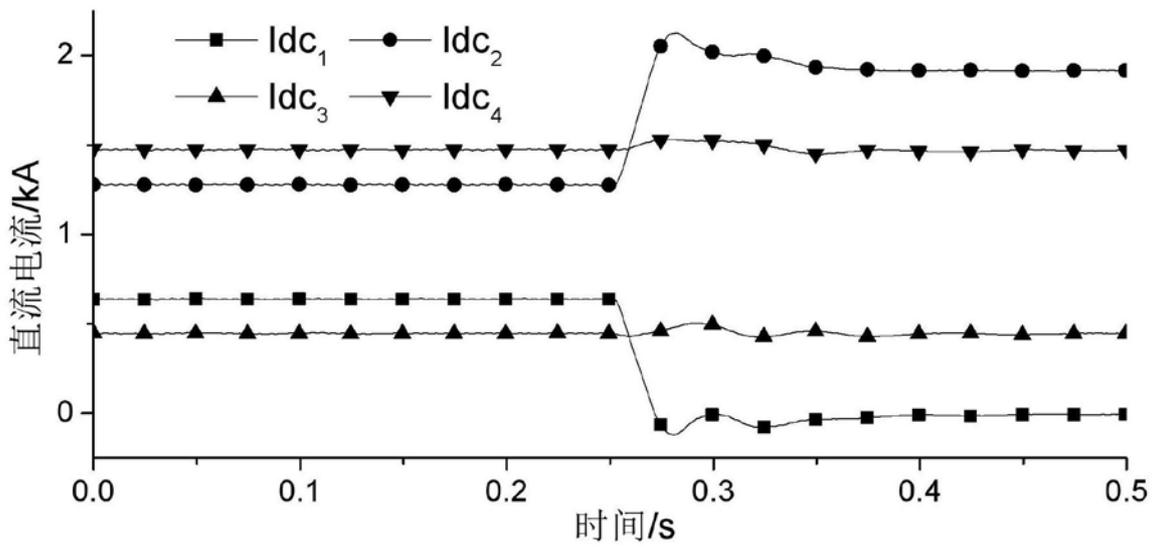


图4