



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103048547 A

(43) 申请公布日 2013. 04. 17

(21) 申请号 201210524649. 4

(22) 申请日 2012. 12. 07

(71) 申请人 国网智能电网研究院

地址 102211 北京市昌平区小汤山镇大东流
村路 270 号(未来科技城)

申请人 中电普瑞电力工程有限公司
上海市电力公司
国家电网公司

(72) 发明人 季兰兰 杨杰 王海田 李泓志
杨越

(74) 专利代理机构 北京安博达知识产权代理有
限公司 11271

代理人 徐国文

(51) Int. Cl.

G01R 27/26(2006. 01)

G01R 31/00(2006. 01)

权利要求书 2 页 说明书 6 页 附图 2 页

(54) 发明名称

一种柔性直流输电用平波电抗器的参数设计
方法

(57) 摘要

本发明公开了一种柔性直流输电用平波电抗器的参数设计方法，包括如下步骤：(1)确定输入参数，包括桥臂电感值 L_{arm} 、线路电感值 L_{line} 、子模块电容值 C_0 和桥臂子模块数量 n ；(2)根据故障电流上升率的抑制条件，确定平波电抗器电感值的下限；(3)根据直流动态响应速度的条件，确定平波电抗器电感值的上限；(4)根据产生谐振的条件，确定平波电抗电感值。本发明能够避免电路参数引起的系统谐振。

1. 一种柔性直流输电用平波电抗器的参数设计方法,其特征在于,所述方法包括如下步骤:

(1)确定输入参数,包括桥臂电感值 L_{arm} 、线路电感值 L_{line} 、子模块电容值 C_0 和桥臂子模块数量 n ;

(2)根据故障电流上升率的抑制条件,确定平波电抗器电感值的下限;

(3)根据直流动态响应速度的条件,确定平波电抗器电感值的上限;

(4)根据产生谐振的条件,确定平波电抗电感值。

2. 如权利要求1所述的参数设计方法,其特征在于,步骤(2)所述根据故障电流上升率的抑制条件,确定平波电抗器电感值下限的步骤包括:

发生直流双极短路故障时,子模块电容放电电流为:

$$i = e^{-\frac{t}{\tau_1}} \left[\sqrt{\frac{C_{eq}}{L_{eq}}} U_{dc}^2 \sin(\omega t + \beta) \right];$$

电流上升率为:

$$\frac{di}{dt} = \sqrt{\frac{C_{eq}}{L_{eq}}} U_{dc}^2 \left[-\frac{1}{\tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \sin(\omega t + \beta) + \omega e^{-\frac{t}{\tau_1}} \cos(\omega t + \beta) \right];$$

式中, L_{eq} 为根据桥臂电抗和平波电抗决定的等效电感值, $L_{eq} = L_{arm} + 3L_s$, L_{arm} 为桥臂电抗电感值; C_{eq} 为等效桥臂子模块电容值; U_{dc} 为直流电压值; τ_1 为放电电流衰减的时间常数;

等效电抗的取值下限为:

$$L_{eq_min} = \frac{C_{eq} U_{dc}^2 \left[-\frac{1}{\tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \sin(\omega t + \beta) + \omega e^{-\frac{t}{\tau_1}} \cos(\omega t + \beta) \right]^2}{\left(\frac{di}{dt} \right)^2};$$

平波电抗的取值下限为:

$$L_{s_min} = \frac{C_{eq} U_{dc}^2 \left[-\frac{1}{\tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \sin(\omega t + \beta) + \omega e^{-\frac{t}{\tau_1}} \cos(\omega t + \beta) \right]^2}{3 \left(\frac{di}{dt} \right)^2} - \frac{L_{arm}}{3}.$$

3. 如权利要求1所述的参数设计方法,其特征在于,步骤(3)所述根据直流动态响应速度的条件,确定平波电抗器电感值上限的步骤包括:

设动态响应速度要求的时间常数阈值为 τ_0 ,则时间常数 $\tau \leq \tau_0$,动态响应速度要求的平波电感值上限为:

$$L_{s_max} = \frac{\tau_0 R}{2} - \frac{L_{arm}}{3}.$$

4. 如权利要求1所述的参数设计方法,其特征在于,步骤(4)所述根据产生谐振的条件,确定平波电抗电感值的步骤为:

相单元投入的子模块数恒定为 n ,用 h 表示谐波次数,站间谐振等效回路阻抗为:

$$Z(h) = 2 \left[\frac{R_{eq}}{3} + j \left(\frac{2h\omega_0 L_{arm}}{3} - \frac{n}{3h\omega_0 C_0} \right) \right] + R_{sl} + jh\omega_0 L_{sl} ;$$

因此：

$$L_{sl} \neq \frac{2n}{3h^2\omega_0^2 C_0} - \frac{4}{3} L_{arm} ;$$

式中， $L_{sl} = L_s + L_{line}$ ， L_s 为平波电抗器电感， L_{line} 为等效线路电感；

$R_{sl} = R_s + R_{line}$ ， R_s 为平波电抗器电阻， R_{line} 为线路等效电阻。

因此，平波电抗器的电感值满足：

$$L_s \neq \frac{2n}{3h^2\omega_0^2 C_0} - \frac{4}{3} L_{arm} - L_{line} .$$

5. 如权利要求 1 所述的参数设计方法，其特征在于，步骤(3)时间常数的表达式为：

$$\tau = \frac{\frac{2L_{arm}}{3} + 2L_s}{R} .$$

一种柔性直流输电用平波电抗器的参数设计方法

技术领域

[0001] 本发明属于柔性直流输电(VSC-HVDC)技术领域，具体涉及一种柔性直流输电用平波电抗器的参数设计方法。

背景技术

[0002] 柔性直流输电技术灵活的应用性能，使其在城市电网互联，新能源并网以及无源负荷供电等领域有着极其广阔的应用前景。平波电抗器是柔性直流换流站中的重要设备之一，其参数直接影响换流系统的谐波特性、控制响应速度以及故障抑制能力。在已有的柔性直流输电技术相关文献中，未见平波电抗器参数设计方法的相关报道，而在常规直流输电中，平波电抗器的设计依据主要考虑如下因素：

[0003] 一是按照系统发生扰动时抑制直流电流上升速度初步设计电感值，由于在常规直流输电中，当一个换流桥发生故障时，由于故障桥的电压在大约3/8周期的一段时间内将连续等于零，因此其直流电压相应下降，而直流电流上升，在电压下降、电流上升的一段时间内，换流器的其他健全桥将换相多次，直流电流的上升使换相时间拉长，如果时间拉长地过多，就会导致健全桥相继发生换相失败。继发的换相失败将使换流器的电压进一步大幅下降，直流电流更快地上升，恶性循环的结果往往使事故扩展到该极所有的桥，以致直流线路只剩下一个极送电，输送功率减小到事故前的一半。因此，必须设法减小由于一个桥换相失败而引起的直流电流的增大。为了达到该目的的平波电抗计算简化公式为

$$L_d = \frac{\Delta U_d}{\Delta I_d} \Delta t = \frac{\Delta U_d (\beta - 1 - \gamma_{\min})}{\Delta I_d \times 360f}$$

[0004] 二是按照减少直流线路中的电压电流纹波的要求决定电感值。在常规直流输电中，平波电抗器按照抑制故障电流上升速度的要求选定之后，由于它同时也起平波作用，因而直流线路电压和电流的纹波一般都比较小。但是还需考虑如下两方面的问题：①纹波对直流线路并行的通讯线路感应杂音，特别是电流纹波的电磁感应，必要时需增设直流滤波器；②小电流时，电流波形的间断问题。

[0005] 柔性直流输电工程中平波电抗器的参数设计与常规直流输电考虑的主要问题是相似的，但是柔性直流输电不存在换相失败的问题，其他故障机理亦不同于常规直流输电，因此抑制故障电流上升速度的参数计算方法也不相同。另外，由于柔性直流输电工程一般采用电缆线路，不需考虑直流电压电流谐波对通讯线路的干扰问题，而且即使采用了架空线路，由于柔性直流输电技术采用的PWM调制或基于正弦逼近的SWM调制方法，换流器交直流通侧输出的电压电流波形质量都较好，一般不需考虑谐波抑制问题。另外，柔性直流输电直流通侧电流也不存在电流断续的问题。

发明内容

[0006] 针对现有技术的不足，本发明提供一种柔性直流输电用平波电抗器的参数设计方法，能够避免电路参数引起的系统谐振。

[0007] 本发明提供的一种柔性直流输电用平波电抗器的参数设计方法，其改进之处在于，所述方法包括如下步骤：

[0008] (1)确定输入参数，包括桥臂电感值 L_{arm} 、线路电感值 L_{line} 、子模块电容值 C_0 和桥臂子模块数量 n ；

[0009] (2)根据故障电流上升率的抑制条件，确定平波电抗器电感值的下限；

[0010] (3)根据直流动态响应速度的条件，确定平波电抗器电感值的上限；

[0011] (4)根据产生谐振的条件，确定平波电抗电感值。

[0012] 其中，步骤(2)所述根据故障电流上升率的抑制条件，确定平波电抗器电感值下限的步骤包括：

[0013] 发生直流双极短路故障时，子模块电容放电电流为：

$$[0014] i = e^{-\frac{t}{\tau_1}} \left[\sqrt{\frac{C_{eq}}{L_{eq}}} U_{dc}^2 \sin(\omega t + \beta) \right];$$

[0015] 电流上升率为：

$$[0016] \frac{di}{dt} = \sqrt{\frac{C_{eq}}{L_{eq}}} U_{dc}^2 \left[-\frac{1}{\tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \sin(\omega t + \beta) + \omega e^{-\frac{t}{\tau_1}} \cos(\omega t + \beta) \right];$$

[0017] 式中， L_{eq} 为根据桥臂电抗和平波电抗决定的等效电感值， $L_{eq} = L_{arm} + 3L_s$ ， L_{arm} 为桥臂电抗电感值； C_{eq} 为等效桥臂子模块电容值； U_{dc} 为直流电压值； τ_1 为放电电流衰减的时间常数；

[0018] 等效电抗的取值下限为：

$$[0019] L_{eq_min} = \frac{C_{eq} U_{dc}^2 \left[-\frac{1}{\tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \sin(\omega t + \beta) + \omega e^{-\frac{t}{\tau_1}} \cos(\omega t + \beta) \right]^2}{\left(\frac{di}{dt} \right)^2};$$

[0020] 平波电抗的取值下限为：

$$[0021] L_{s_min} = \frac{C_{eq} U_{dc}^2 \left[-\frac{1}{\tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \sin(\omega t + \beta) + \omega e^{-\frac{t}{\tau_1}} \cos(\omega t + \beta) \right]^2}{3 \left(\frac{di}{dt} \right)^2} - \frac{L_{arm}}{3}.$$

[0022] 其中，步骤(3)所述根据直流动态响应速度的条件，确定平波电抗器电感值上限的步骤包括：

[0023] 设动态响应速度要求的时间常数阈值为 τ_0 ，则时间常数 $\tau \leq \tau_0$ ，动态响应速度要求的平波电感值上限为：

$$[0024] L_{s_max} = \frac{\tau_0 R}{2} - \frac{L_{arm}}{3}.$$

[0025] 其中，步骤(4)所述根据产生谐振的条件，确定平波电抗电感值的步骤为：

[0026] 相单元投入的子模块数恒定为 n ，用 h 表示谐波次数，站间谐振等效回路阻抗为：

$$[0027] Z(h) = 2 \left[\frac{R_{eq}}{3} + j \left(\frac{2h\omega_0 L_{arm}}{3} - \frac{n}{3h\omega_0 C_0} \right) \right] + R_{st} + jh\omega_0 L_{st};$$

[0028] 因此：

$$[0029] L_{sl} \neq \frac{2n}{3h^2\omega_0^2C_0} - \frac{4}{3}L_{arm};$$

[0030] 式中, $L_{sl} = L_s + L_{line}$, L_s 为平波电抗器电感, L_{line} 为等效线路电感;

[0031] $R_{sl} = R_s + R_{line}$, R_s 为平波电抗器电阻, R_{line} 为线路等效电阻。

[0032] 因此, 平波电抗器的电感值满足:

$$[0033] L_s \neq \frac{2n}{3h^2\omega_0^2C_0} - \frac{4}{3}L_{arm} - L_{line}.$$

[0034] 其中, 步骤(3)时间常数的表达式为:

$$[0035] \tau = \frac{\frac{2L_{arm}}{3} + 2L_s}{R}.$$

[0036] 与现有技术比, 本发明的有益效果为:

[0037] 1、本发明的方法不需考虑换相失败、通信干扰及谐波抑制问题, 因此简单易行;

[0038] 2、本发明考虑了故障电流上升率的抑制要求, 使电容放电电流上升速度得到有效抑制, 保证了器件使用安全, 减轻了对保护系统设计的要求;

[0039] 3、本发明考虑了系统动态响应速度的要求, 保证了柔性直流输电系统的自动调节特性, 同时降低了平波电抗器的造价;

[0040] 4、本发明兼顾了故障电流上升率的抑制和系统动态响应速度要求, 使系统综合性能达到最优;

[0041] 5、本发明通过对柔性直流输电系统谐振回路谐振点进行排除, 使柔性直流输电系统的固有振荡频率避开基频和换流器的特征次谐波频率, 避免电路参数引起的系统谐振。

附图说明

[0042] 图 1 为本发明提供的换流器的放电回路示意图。

[0043] 图 2 为本发明提供的双极短路故障放电等效二阶电路图。

[0044] 图 3 为本发明提供的系统谐振回路的等效电路图。

具体实施方式

[0045] 下面结合附图对本发明的具体实施方式作进一步的详细说明。

[0046] 平波电抗器是柔性直流输电换流站重要的设备之一, 在柔性直流换流站中的作用主要有:

[0047] 1、限制故障电流的上升率;

[0048] 2、防止直流线路或直流失场所产生的陡波冲击波进入阀厅, 从而使换流阀免于遭受过电压应力而损坏;

[0049] 3、平滑直流电流中的纹波。

[0050] 直流双极短路故障是柔性直流输电系统最为严重的故障之一, 发生直流双极短路故障时, 故障电流发展迅速、故障电流值较大, 设备承受严酷的电流应力。双极短路故障往往由两极线路之间的绝缘失效引起, 目前大部分柔性直流输电工程采用电缆线路连接, 为了节省输电走廊, 正负极电缆分布距离很近, 很可能被同时挖断形成短路, 同时架空线由于

树枝等也可能形成双极短路,如图 1 所示。

[0051] 对于模块化多电平换流器(MMC)拓扑的柔性直流输电系统,直流双极短路故障包括两个过程,一是换流器闭锁前,两侧换流站都通过子模块下部二极管向短路点注入短路电流,相当于三相短路。同时,子模块电容器通过上部的 IGBT 放电,放电回路如图 1 所示。桥臂电流是交流短路电流和子模块电容器放电电流的叠加,在半个周波内达到峰值,几毫秒后换流器闭锁,直流双极短路故障进入第二个过程,此时,子模块电容器停止放电,但交流短路电流仍通过故障点形成短路。在第一阶段中,由于故障电流流经换流阀,此时阀承受的电流为交流电流与电容放电电流的组合,其中电容放电电流起到决定性作用,闭锁前的短路电流主要由电容放电电流决定,而电容放电电流的大小和速度取决于桥臂电抗和平波电抗值,桥臂电抗和平波电抗对电容放电电流有明显的抑制作用,当总电抗值较小时,电容放电电流上升速度很快,对保护速度要求高,因此需合理设计桥臂电抗与平波电抗值达到故障抑制要求。其中,桥臂电抗器的值已经根据柔性直流输电系统对功率传输的要求确定,因此对直流双极短路故障抑制的要求通过平波电抗器的设计来满足。

[0052] 由于电感值越大,柔性直流输电系统的响应时间越长,因此平波电抗器在满足故障抑制要求的同时还应兼顾系统的动态响应速度,同时还应校核所选的平波电抗器电感值与桥臂电抗、线路电抗、桥臂电容、线路电容不形成谐振。

[0053] 平波电抗器最主要的参数是其电感量,从平波电抗器抑制直流谐波和抑制故障电流的角度看,其电感值应趋于较大值,但也不能太大。因为电感量太大,运行时容易产生过电压,使直流输电系统的控制响应速度下降,而且平波电抗器的投资也增加。因此平波电抗器的电感量在满足主要性能要求的前提下应尽量小些。针对现有文献中无柔性直流输电平波电抗器参数设计方法的介绍,且常规直流输电平波电抗器设计原理不同于柔性直流输电的特点,本实施例提出了一种柔性直流输电平波电抗器参数设计方法如下:

[0054] 1、限制故障电流的上升率

[0055] 此时电容放电电流可以通过图 2 所示的等效二阶电路进行估算。MMC 拓扑结构的电压源型换流器中,平波电抗器串联在直流极线上能够有效抑制直流双极短路故障的故障电流上升速度。发生直流双极短路故障时,子模块电容放电电流为:

$$[0056] i = e^{-\frac{t}{\tau_1}} \left[\sqrt{\frac{C_{eq} U_{dc}^2}{L_{eq}}} \sin(\omega t + \beta) \right];$$

[0057] 电流上升率为:

$$[0058] \frac{di}{dt} = \sqrt{\frac{C_{eq} U_{dc}^2}{L_{eq}}} \left[-\frac{1}{\tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \sin(\omega t + \beta) + \omega e^{-\frac{t}{\tau_1}} \cos(\omega t + \beta) \right];$$

[0059] 其中, $L_{eq} = L_{arm} + 3L_s$, L_{arm} 为桥臂电抗电感值, C_{eq} 为等效桥臂子模块电容值。可见,增加了平波电抗器电感值 L_s 后,故障电流的上升率下降了。因此等效电抗的取值下限为:

$$[0060] L_{eq_min} = \frac{C_{eq} U_{dc}^2 \left[-\frac{1}{\tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \sin(\omega t + \beta) + \omega e^{-\frac{t}{\tau_1}} \cos(\omega t + \beta) \right]^2}{\left(\frac{di}{dt} \right)^2};$$

[0061] 平波电抗的取值下限为:

$$[0062] L_{s_min} = \frac{C_{eq} U_{dc}^2 \left[-\frac{1}{\tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \sin(\omega t + \beta) + \omega e^{-\frac{t}{\tau_1}} \cos(\omega t + \beta) \right]^2}{3 \left(\frac{di}{dt} \right)^2} - \frac{L_{arm}}{3};$$

[0063] 2、直流动态响应速度

[0064] 如图 1 所示, 电路时间常数 $\tau = \frac{2L_{arm} + 2L_s}{R}$, R 为电路等效电阻。平波电抗值越大, 时间常数越大, 柔性直流输电系统动态响应速度越慢, 因此, 平波电抗器的电感值也不能过大, 否则柔性直流输电系统直流侧动态响应速度将不能满足要求。

[0065] 设动态响应速度要求的时间常数阈值为 τ_0 , 则 $\tau \leq \tau_0$, 因此满足动态响应速度要求的平波电感值上限为 :

$$[0066] L_{s_max} = \frac{\tau_0 R}{2} - \frac{L_{arm}}{3}.$$

[0067] 3、避免谐振

[0068] 由于 MMC 拓扑的特点在于保证每个相单元有固定的电容数投入, 因此对于每个桥臂来说, 投入的电容值大小固定, 同时由于桥臂电抗和平波电抗的存在, 整个换流站有一个固有的振荡频率, 该频率由电容和电感的大小决定。由于电感的电阻很小, 当系统投入或发生功率振荡时, 很可能发生谐振, 如果不加以控制, 很难抑制该振荡的衰减, 同时振荡电流会导致电容电压的进一步不平衡, 很可能加剧该振荡。

[0069] 平波电抗器的电感取值应避开基频和换流器的特征次谐波频率。相单元投入的子模块数恒定为 n , 用 h 表示谐波次数, 当电缆线路较短时, 线路对地电容较换流站等效电容小得多, 可以忽略, 根据图 3 所示, 站间谐振等效回路阻抗为 :

$$[0070] Z(h) = 2 \left[\frac{R_{eq}}{3} + j \left(\frac{2h\omega_0 L_{arm}}{3} - \frac{n}{3h\omega_0 C_0} \right) \right] + R_{sl} + jh\omega_0 L_{sl};$$

[0071] 因此有 :

$$[0072] L_{sl} \neq \frac{2n}{3h^2\omega_0^2 C_0} - \frac{4}{3} L_{arm};$$

[0073] 式中, $L_{sl} = L_s + L_{line}$, L_s 为平波电抗器电感, L_{line} 为等效线路电感;

[0074] $R_{sl} = R_s + R_{line}$, R_s 为平波电抗器电阻, R_{line} 为线路等效电阻。

[0075] 因此, 为不引起谐振, 平波电抗器的电感值应满足 :

$$[0076] L_s \neq \frac{2n}{3h^2\omega_0^2 C_0} - \frac{4}{3} L_{arm} - L_{line};$$

[0077] 综上所述, 本实施例提供的一种柔性直流输电用平波电抗器的参数设计方法, 具体实施步骤如下 :

[0078] 步骤 1 : 确定输入参数, 包括桥臂电感值 L_{arm} 、线路电感值 L_{line} 、子模块电容值 C_0 、桥臂子模块数量 n ;

[0079] 步骤 2 : 根据故障电流上升率的抑制要求, 确定平波电抗器电感值的下限为

$$[0080] L_{s_min} = \frac{C_{eq} U_{dc}^2 \left[-\frac{1}{\tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \sin(\omega t + \beta) + \omega e^{-\frac{t}{\tau_1}} \cos(\omega t + \beta) \right]^2}{3 \left(\frac{di}{dt} \right)^2} - \frac{L_{arm}}{3};$$

[0081] 步骤 3 :根据直流动态响应速度的要求,确定平波电抗器的上限为

$$[0082] L_{s_max} = \frac{\tau_0 R}{2} - \frac{L_{arm}}{3};$$

[0083] 步骤 4 :根据避免谐振的要求,即 $L_s \neq \frac{2n}{3h^2 \omega_0^2 C_0} - \frac{4}{3} L_{arm} - L_{line}$,排除由步骤 2 和 3 确定的可行区间中的引起谐振的平波电抗电感值。

[0084] 最后应当说明的是:以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非对其限制,尽管参照上述实施例对本发明进行了详细的说明,所属领域的普通技术人员应当理解:依然可以对本发明的具体实施方式进行修改或者等同替换,而未脱离本发明精神和范围的任何修改或者等同替换,其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

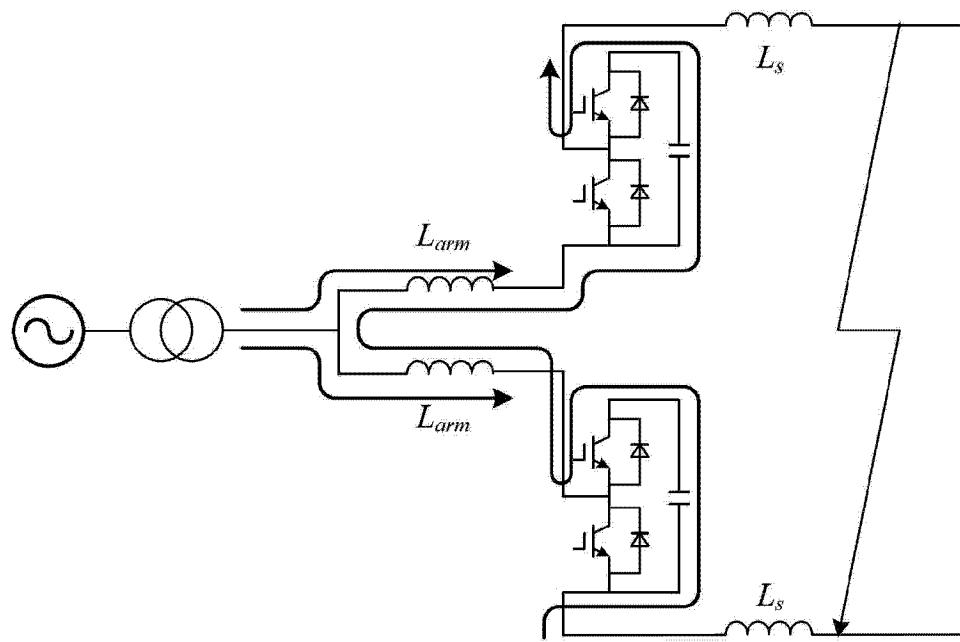


图 1

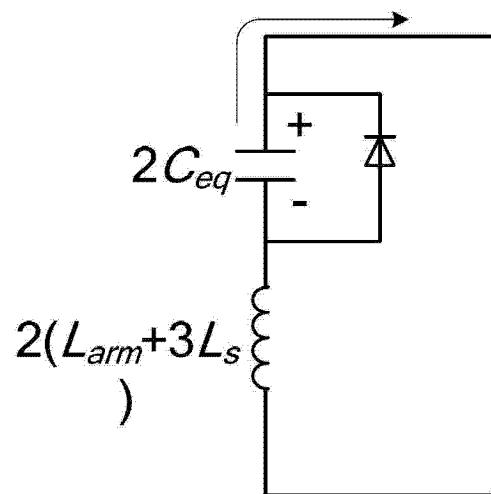


图 2

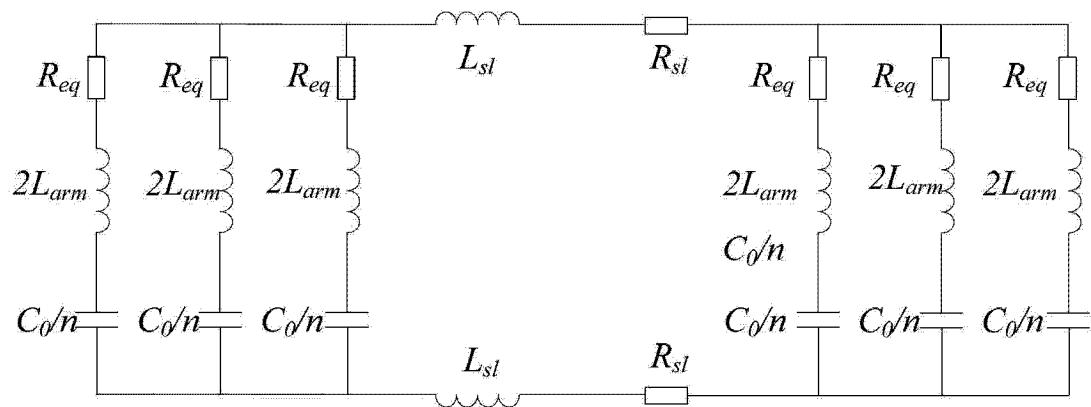


图 3