

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200710121258.7

[51] Int. Cl.

H02M 1/32 (2006.01)

H02M 5/44 (2006.01)

H02H 7/122 (2006.01)

[43] 公开日 2008 年 3 月 5 日

[11] 公开号 CN 101136582A

[22] 申请日 2007.9.3

[21] 申请号 200710121258.7

[71] 申请人 中国科学院电工研究所

地址 100080 北京市海淀区中关村北二条 6
号

共同申请人 北京科诺伟业科技有限公司

[72] 发明人 李建林 胡书举 许洪华

[74] 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责任公
司

代理人 关 玲 成金玉

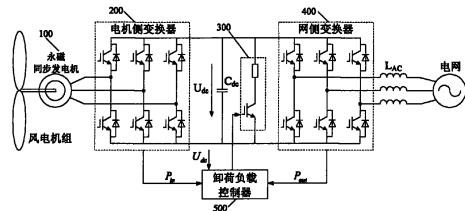
权利要求书 1 页 说明书 5 页 附图 2 页

[54] 发明名称

一种全功率变流器直流侧卸荷电路的控制方
法

[57] 摘要

一种全功率变流器直流侧卸荷电路的控制方法，卸荷电路由功率器件和卸荷电阻构成，卸荷电路控制器通过采集输入有功功率、输出有功功率和直流侧电压，以输入和输出有功功率的偏差作为卸荷电路的主要控制条件，以直流侧电压作为卸荷电路的辅助控制条件，与电网侧变流器的直流侧电压外环配合，当电网电压发生跌落等短时故障时，保持直流侧电压稳定。本发明通过输入和输出有功功率偏差确定直流侧卸荷电路需要消耗的功率，能够减少电网故障时直流侧电压的波动，方便与网侧变流器配合，可以对直驱型风电系统变流器的直流侧进行有效保护，增强其低电压穿越能力。



1. 一种全功率变流器直流侧卸荷电路的控制方法，其特征在于，卸荷电路控制器(500)对由功率器件和卸荷电阻构成的直流侧卸荷电路(300)进行控制；卸荷电路控制器采集变流器的输入有功功率 P_{in} 、输出有功功率 P_{out} 和直流侧电压 U_{dc} ，计算输入有功功率 P_{in} 和输出有功功率 P_{out} 的偏差，以输入有功功率 P_{in} 和输出有功功率 P_{out} 的偏差 ΔP 作为控制卸荷电路(300)的主要条件，判断是否需要投入直流侧卸荷电路(300)，以及投入卸荷电路时卸荷电路(300)中功率器件的导通占空比；当根据功率偏差对卸荷电路的控制不够快，或者直流侧电压上升幅度较大时，以直流侧电压 U_{dc} 作为辅助判断条件对卸荷电路(300)进行控制。

2. 根据权利要求 1 所述的全功率变流器直流侧卸荷电路的控制方法，其特征在于，有功功率偏差作为卸荷电路的主要控制条件，对输入、输出有功功率偏差 ΔP 进行判断，当 $\Delta P \leq \Delta P_{max}$ 时，不需要投入直流侧卸荷电路(300)；当 $\Delta P > \Delta P_{max}$ 时，投入卸荷电路(300)，对 ΔP 进行 PI 调节，使直流侧多余的能量消耗在卸荷电路(300)的卸荷电阻上，当 ΔP 重新满足小于 ΔP_{max} 时，切出卸荷电路(300)的卸荷电阻；投入和切出的设定值之间设置滞环，以防止卸荷电路频繁投切。

3. 根据权利要求 1 所述的全功率变流器直流侧卸荷电路的控制方法，其特征在于，如果功率偏差对卸荷电路的控制不够快，或当直流侧电压升高至 U_{dc_max} 时，完全投入卸荷电路(300)的卸荷电阻，当直流侧电压降至一定值时，切出卸荷电路(300)的卸荷电路。

4. 根据权利要求 1 所述的全功率变流器直流侧卸荷电路的控制方法，其特征在于，采集交流侧电压、电流，获取输入有功功率 P_{in} 、输出有功功率 P_{out} ，将交流侧的三相电压、电流值进行 3/2 和 dq 变换，将交流量转化为直流量，通过 $1.5(u_q i_q + u_d i_d)$ 计算得到对应的有功功率，计算输入有功功率 P_{in} 时需要增加定子侧电压的采集；也可以通过采集直流侧电压、电流，获取输入有功功率 P_{in} 和输出有功功率 P_{out} ；直流侧电容和卸荷电路两侧的电流 I_{in} 、 I_{out} ，分别为直流侧的输入和输出电流，直流侧电压为 U_{dc} ，则 $U_{dc}(I_{in} - I_{out})$ 为直流侧输入有功功率 P_{in} 和输出功率 P_{out} 之差。

5. 根据权利要求 1 或 4 所述全功率变流器直流侧卸荷电路的控制方法，其特征在于，当以直流侧电压作为条件使卸荷电路投入工作时，从卸荷电路投入工作到卸荷电路切出，均以直流侧电压 U_{dc} 作为判断条件，以防止功率偏差和直流侧电压两种判断条件之间产生交错影响。

一种全功率变流器直流侧卸荷电路的控制方法

技术领域

本发明涉及一种全功率变流器直流侧卸荷电路的控制方法，特别涉及直接驱动型变速恒频风力发电系统全功率变流器直流侧卸荷电路的控制方法。

背景技术

随着风力发电规模的不断增大，并网风电系统对电网的影响越来越大，目前在风力发电技术发展领先的一些国家，如丹麦、德国等国相继制定了新的电网运行准则，定量的给出了风电系统离网的条件(如最低电压跌落深度和跌落持续时间)，只有当电网电压跌落低于规定曲线以后才允许风力机脱网，因此要求风电系统具有较强的低电压穿越(LVRT)能力。永磁同步发电机构成的直驱式变速恒频风电系统通过全功率变流器与电网连接，和双馈式变速恒频风力发电系统比较，电网故障对发电系统的影响较少，具有较强的 LVRT 能力。

当电网电压跌落时，永磁直驱式风电系统变流器将增加电流以便提供同样大小的功率给电网，由于变流器的热容量有限，必须对输出电流进行限制；当跌落幅度较大时，直流侧电容的输入和输出功率会发生不平衡，输入功率大于输出功率，如果直流侧不采取措施，直流侧电压将会升高，此时可以通过限制电机侧变流器的脉宽，限制发电机流入直流侧的功率，但这会造成定子侧输出功率降低，电磁转矩也随之降低，假设此时风电机组输入的机械功率保持不变，则发电机转子将会加速，转速的增加会激发风机桨矩控制器，对捕获的风能进行限制，当转速不能被快速限制时，投入带有断路器的卸载负载，消耗多余的能量和限制直流侧电压。电压跌落等电网故障通常持续的时间较短，而上述过程使电网故障对变流器、发电机和风电机组的运行均产生了影响，不利于使系统在故障消除后快速恢复至正常运行，同时降低了系统的运行效率。

通过对永磁直驱风电系统控制方法的改进可以在一定程度上提高其 LVRT 能力，但是提高的程度有限，因此需要增加应对电压跌落等故障的硬件电路以提高低电压穿越能力。在直流侧增加卸荷电路是一种常用的方法，卸荷电路通常由功率器件和卸荷电阻构成，通过控制功率器件投入和切出卸荷电路，调节直流侧电压。美国专利 6,819,535 采用直流侧电压作为判断条件，如图 1a 所示，当直流侧电压超过设定的上限时，投入卸荷电阻，当直流侧电压

低于设定的下限电压时，切出卸荷电阻，这种方法会造成直流侧电压波动较大。文献 1(Remus Teodorescu, Frede Blaabjerg. Flexible Control of Small Wind Turbines with Grid Failure Detection Operating in Stand-Alone and Grid-Connected Mode. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, 2004, 19(5): 1323-1332.)采用图 1b 所示的方法，同样采用直流侧电压作为判断条件，对直流侧电压的偏差进行 PI 调节，控制卸荷电路中功率器件的导通占空比，和前一种方法比较，这种方法会降低直流侧电压的波动。这两种方法的优点是控制简单，反应速度较快，但是仅以直流侧电压作为判断条件，与电网侧交流器的直流侧电压环较难配合，必须当直流侧电压高于一定值时卸荷电路才会起作用，因此这些方法，特别是图 1a 的方法会造成直流侧电压有较大的波动，影响直流侧电容的使用寿命。

发明内容

本发明的目的在于克服现有技术造成的直流侧电压波动较大的缺点，提供一种新的直流侧卸荷电路的控制方法，当电网电压发生故障时，可以有效降低直流侧电压波动，提高直流侧电容的使用寿命。特别是对于大型风电系统，交流器直流侧电容的容量较大，成本也较高，本发明对提高大型风电系统直流侧电容的寿命有较大意义。

直驱型变速恒频系统功率回路主要由风电机组、发电机、发电机侧交流器、直流侧电容、直流侧卸荷电路、电网侧交流器、电网侧滤波电感构成。由风电机组拖动风力发电机，把捕获的风能转化为电能，通过发电机侧交流器转化为直流电，直流侧电容作为能量缓冲环节，稳定直流侧电压，由电网侧交流器把直流电逆变为交流电，通过滤波电感并入电网。发电机侧交流器通过调节发电机定子侧的 d 轴和 q 轴电流，控制发电机的转矩和定子的无功功率(通常无功设定值为 0)，电网侧交流器通过调节网侧的 d 轴和 q 轴电流，控制直流侧电压和流向电网的无功功率，实现输出有功和无功的解耦控制，输出通常为单位功率因数。直流侧卸荷电路并联在直流侧正负母线上，由半导体功率器件和卸荷电阻串联构成。

本发明采用卸荷电路控制器对由功率器件和卸荷电阻构成的卸荷电路进行控制。卸荷电路控制器采集输入有功功率、输出有功功率和直流侧电压，通过计算和判断确定卸荷电路是否需要投入工作，以及卸荷电路需要投入时，功率器件的工作方式。卸荷电路控制器采集交流器输入、输出有功功率，以输入和输出有功功率的偏差作为主要判断条件，通过判断输入和输出有功功率的偏差，确定卸荷电路是否需要投入运行，若需要投入运行卸荷电路，则根据输入和输出有功功率的偏差，通过 PI 调节器确定功率器件的导通占空比。卸荷电路控制器采集直流侧电压作为辅助判断条件，当根据功率偏差对卸荷电路的控制不够快，或者直流侧电压上升幅度较大时，由直流侧电压作为条件对卸荷电路进行控制。输入、输出有功功率

的获取，可以采集交流侧的有功功率值，也可以采集直流侧的有功功率值。

当电网电压发生短时跌落故障时，电网侧变流器为保持输出功率恒定，输出电流将会增大，当电流达到限流值时，输出功率受到了限制，此时风电机组和发电机保持正常运行，电机侧变流器保持其控制不变，则直流侧输入功率大于输出功率，直流侧电容将会上升。直流侧电容上升时，网侧变流器的直流侧电压外环首先起作用，增大网侧变流器功率器件的占空比，当电流达到限流值后，直流侧电压外环饱和，电网侧变流器失去对直流侧电压的控制作用。当电网电压跌落幅度较小时，输出电流的增大在限流值以内，此时不必投入卸荷电路，网侧变流器即可保持直流侧电压的稳定；当跌落幅值较大时，电网侧变流器对直流侧电压的调节作用是有限的，必须投入卸荷电路，才能保证电网故障对风电机组和发电机的运行基本不产生影响。

卸荷电路控制器通过检测输入、输出有功功率值，以功率偏差作为主要判断条件，当功率偏差超过一定值时，投入卸荷电路；以直流侧电压作为辅助判断条件，以应对直流侧电压突然升高的情况，增强控制的可靠性。直流侧电容电压的控制方程为：

$$\frac{1}{2}C \frac{d(U_{dc}^2)}{dt} = P_m - P_{out} = \Delta P$$

其中， P_m 是永磁同步电机定子侧输出的有功功率， P_{out} 是电网从风电系统中吸收的有功功率。

卸荷电路投入时的导通占空比可由下式给出：

$$\frac{(dU_{dc})^2}{R_d} = \Delta P$$

其中 R_d 为卸荷电阻， d 为卸荷电路功率器件的导通占空比，上式表明当直流侧功率不平衡时，由卸荷电阻吸收多余的功率。

系统正常运行时， U_{dc} 和 ΔP 在有限范围内波动，此时 $d = 0$ ，也即卸荷电路不参与工作；当 ΔP 超出设定值时，立刻投入卸荷电路，当 U_{dc} 超出允许值时，使 $d = 1$ ，完全投入卸荷电阻。

附图说明

图 1a、图 1b 为传统的卸荷电路控制方法原理图；

图 2 为直驱式变速恒频风力发电系统结构图；

图 3 为本发明中直流侧卸荷电路控制原理图；

图 4a、图 4b 为输入、输出有功功率的获取方法。

具体实施方式

下面结合附图和具体实施方式进一步说明本发明。

图 2 所示为本发明应用对象直驱式变速恒频风电系统。首先对直接驱动型变速恒频风电系统的结构进行说明。如图 2 所示，风电机组驱动永磁同步发电机 100，永磁同步发电机 100 产生的交流电经过发电机侧变流器 200 整流，得到直流电，直流侧电容 C_{dc} 起到稳定直流侧电压的作用，卸荷电路 300 作为直流侧过电压的保护装置，电网侧变流器 400 把直流电逆变为交流电，通过电网侧滤波电感并入电网。其中永磁同步发电机 100 也可以使用其他类型的发电机，如感应电机等，发电机侧变流器使用三相 PWM 整流器，也可以采用其他的整流拓扑，如三相不控整流 + Boost 升压变流器等。卸荷电路 300 并联在直流侧正负母线上，由半导体功率器件与卸荷电阻串联构成，其中功率器件通常是 IGBT 等半导体器件，也可以采用其他的快速自关断器件。电网侧变流器 400 使用三相 PWM 逆变器，通常采用电网电压定向的矢量控制策略，控制方法采用双环控制，外环为直流侧电压环，电网正常条件下可以稳定直流侧电压，内环为电流环，实现输出有功和无功功率的解耦控制，通常无功输出设定为 0，实现输出侧的单位功率因数。

本发明采用卸荷电路控制器 500 对卸荷电路 300 进行控制。当电网发生故障时，由卸荷电路 300 消耗直流侧多余的能量，使电网电压跌落等短时故障对风电机组和发电机的运行基本不产生影响，从而提高直驱式风电系统的低电压穿越能力，通过采集输入有功功率 P_{in} 、输出有功功率 P_{out} 和直流侧电压 U_{dc} ，判断是否需要投入直流侧卸荷电路，以及投入卸荷电路时卸荷电路功率器件的导通占空比。

图 3 是本发明中卸荷电路控制器 500 的原理图，图中虚线框内为卸荷电路控制器 500，输入至卸荷电路控制器的变量有输入有功功率 P_{in} 、输出有功功率 P_{out} 和直流侧电压 U_{dc} ，通过计算($P_{in} - P_{out}$)得到功率偏差 ΔP ，然后对 ΔP 进行判断，当 ΔP 在合理范围时，进入 PI 调节器，PI 调节器的输出与三角波比较形成占空比 d ，占空比 d 同时取决于直流侧电压 U_{dc} ，即 d 由两路判断条件决定。

卸荷电路控制器 500 主要包括 DSP 和 PI 调节器。以下对卸荷电路控制器 500 的工作原理进行详细说明，本发明的卸荷电路控制器 500 基于 DSP 作为控制载体实现。由 DSP 通过计算($P_{in} - P_{out}$)得到功率偏差 ΔP ，但不是有功率偏差即投入卸荷电路，因为正常运行时输入和输出功率也是有波动的。同时网侧变流器有一定的过流能力，通过网侧变流器可以在限流的范围内调节直流侧电压。当网侧变流器对直流侧电压的调节作用达到极限时，需要投入直流侧卸荷电路，因此需要对功率偏差 ΔP 进行判断，当 $\Delta P \leq \Delta P_{max}$ 时，不需要投入直流侧卸

荷电路。当 $\Delta P > \Delta P_{max}$ 时，投入卸荷电路，对 ΔP 进行 PI 调节，输出 PWM 信号至功率器件，使直流侧多余的能量消耗在卸荷电阻上，当 ΔP 重新满足小于 ΔP_{max} 时，切出卸荷电阻的作用，投入和切出的设定值之间要设置一定的滞环，这是一种常用的方法，滞环参数的选择要根据实际系统进行调整，以防止卸荷电路频繁的投切。直流侧电压 U_{dc} 作为辅助的判断条件，如果功率偏差对卸荷电路的控制不够快，或者直流侧电压突然上升较快，则当直流侧电压升高至 U_{dc_max} 时，完全投入卸荷电阻，当直流侧电压降至一定值时，切出卸荷电路。其中以功率偏差作为判断条件的控制是主要控制，以直流侧电压作为判断条件的控制是辅助控制，当以直流侧电压作为条件使卸荷电路投入工作时，从卸荷电路投入工作，直到卸荷电路切出均是以直流侧电压作为判断条件，以防止两种判断条件之间产生交错影响。以上过程中计算、判断以及控制均由 DSP 完成，当 DSP 发出控制信号后，由器件驱动电路控制卸荷电路功率器件的导通或关断，由此控制卸荷电路的投入或切出。

图 4a、图 4b 是输入有功功率 P_{in} 、输出有功功率 P_{out} 的获取方法。图 4a 通过采集交流侧电压、电流，获取输入有功功率 P_{in} 和输出有功功率 P_{out} 。图 4b 通过采集直流侧电压、电流，获取输入有功功率 P_{in} 和输出有功功率 P_{out} 。采样工作通常由采样器件(如传感器或霍尔元件)和信号调理电路完成，采样信号送入 DSP 的 AD 通道，由 DSP 完成功率值的计算。图 4a 的方法通过采集交流侧电压、电流，获取输入有功功率 P_{in} 、输出功率 P_{out} ，主电路采用双 PWM 变流器结构器，发电机侧和电网侧变流器通常都采用矢量控制，以 DSP 为计算载体，因此首先需要将交流侧的三相电压、电流值进行 3/2 和 dq 变换，将交流量转化为直流量，通过 $1.5(u_q i_q + u_d i_d)$ 计算得到对应的有功功率。发电机侧变流器的矢量控制通常不需要采集发电机定子侧输出的三相电压，因此计算输入有功功率 P_{in} 时需要增加定子侧电压的采集。图 4b 的方法是通过采集直流侧电压、电流，获取输入有功功率 P_{in} 、输出功率 P_{out} ，直流侧电容和卸荷电路两侧的电流 I_{in} 、 I_{out} ，分别为直流侧的输入和输出电流，直流侧电压为 U_{dc} ，则 $U_{dc}(I_{in} - I_{out})$ 即可认为是直流侧输入和输出功率之差，但是直流侧电压和电流可能存在较大的纹波，因此需要通过信号调理电路获取各参数的直流量，输入 DSP 中计算得到输入和输出有功功率。

本发明可以根据需要应用于不同的场合。例如，本发明可以用于双馈型变速恒频风电系统的直流侧保护，也可以应用于通用变频器制动时的直流测保护。

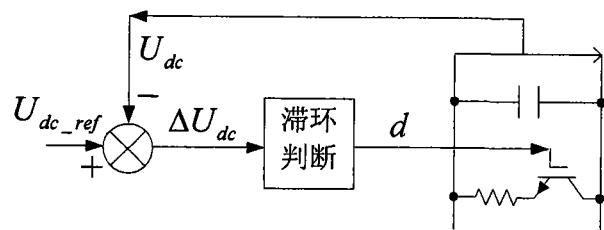


图 1a

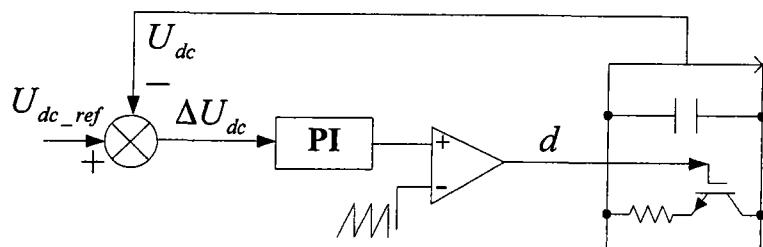


图 1b

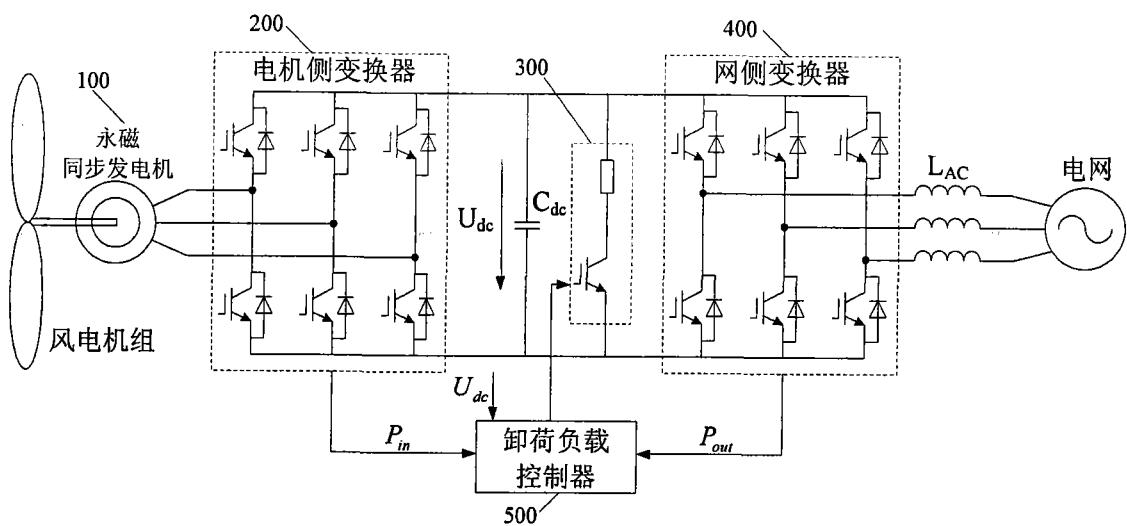


图 2

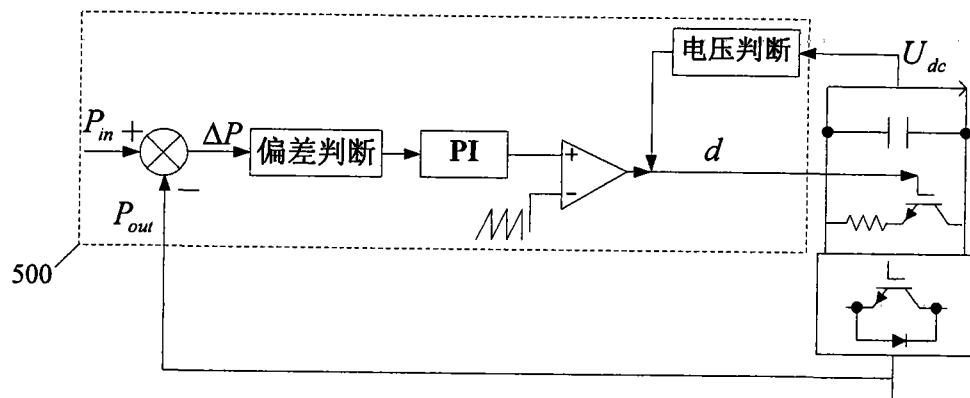


图 3

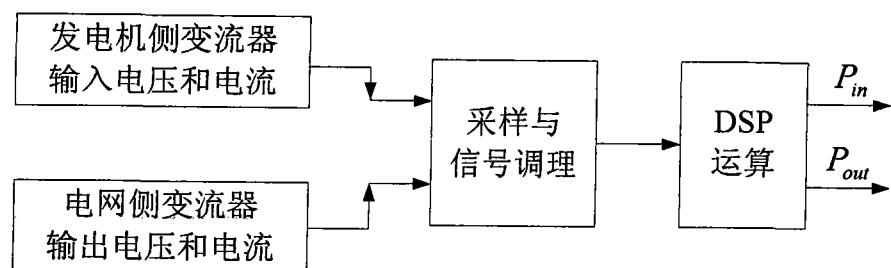


图 4a

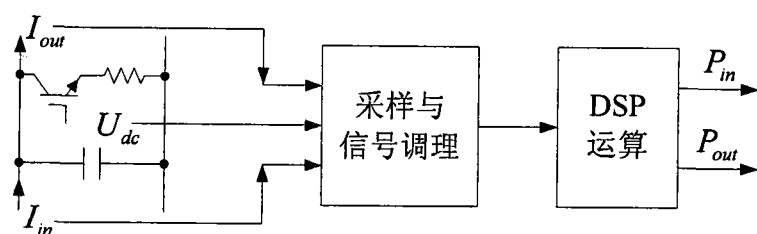


图 4b