

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
H02J 3/38 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200910080975.9

[43] 公开日 2009年8月19日

[11] 公开号 CN 101510695A

[22] 申请日 2009.3.31

[21] 申请号 200910080975.9

[71] 申请人 北京清能华福风电技术有限公司

地址 100084 北京市海淀区农大南路1号硅谷亮城2A座401室

[72] 发明人 苑国锋 郑艳文 龚细秀

[74] 专利代理机构 北京北新智诚知识产权代理有限公司

代理人 张爱群

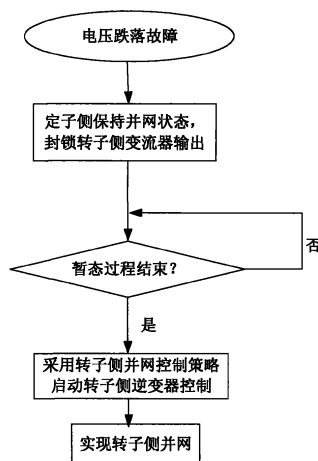
权利要求书2页 说明书7页 附图3页

[54] 发明名称

一种双馈异步风力发电机转子侧并网控制方法

[57] 摘要

本发明提供了一种风力发电机转子侧并网控制方法，发电机的定子侧在整个过程中始终与电网保持连接，而仅是通过对转子侧变流器采用封锁的软断开手段对发电机转子侧变流器实施保护。这样的控制方法既起到了保护发电机转子侧变流器的作用，又保证了发电机始终与电网连接，不会影响电网的稳定性。并且，由于转子侧变流器与发电机转子之间是通过软断开手段实现切换。因此，能够克服传统双馈发电机由于脱网再并网的时间比较长的缺点，满足电力系统对于风力发电机不间断运行的要求。



1、一种双馈异步风力发电机转子侧并网控制方法，其特征在于：该转子侧并网控制方法具体包括如下步骤：

(1) 当发电机检测到电网电压跌落故障后，保持双馈异步风力发电机的定子侧与电网相连，封锁转子侧变流器；

(2) 发电机检测电网电压是否仍然处于跌落；若是，则返回步骤(1)；若否，则转入步骤(3)；

(3) 解除对所述转子侧变流器的封锁；以风力发电机作为虚拟电网，采用转子侧并网控制算法启动转子侧变流器的控制；

(4) 当控制转子侧变流器输出电压与风力发电机转子电压相匹配时，恢复转子侧变流器对发电机转子的电压控制，实现转子侧并网。

2、如权利要求1所述的转子侧并网控制方法，其特征在于：所述步骤(1)中封锁转子侧变流器是由发电机的控制单元停止向转子侧变流器的功率开关发送动作信号，使得双馈异步风力发电机的转子侧无电压输入。

3、如权利要求1所述的转子侧并网控制方法，其特征在于：所述步骤(3)中转子侧并网控制算法具体包括如下步骤：

(3A) 检测三相定子电压 u_a 、 u_b 、 u_c ，三相转子电流 i_{ra} 、 i_{rb} 、 i_{rc} ，转子位置角 θ_r 以及直流母线电压 u_{dc} ；

(3B) 将所述三相定子电压 u_a 、 u_b 、 u_c 经过 3/2 变换得到定子两相静止坐标系下的定子电压 $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ ；所述三相转子电流 i_{ra} 、 i_{rb} 、 i_{rc} 经过 3/2 变换得到转子两相静止坐标系下的转子电流 $i_{r\alpha}$ 、 $i_{r\beta}$ ；所述的转子位置角 θ_r 经过微分运算，得到转子旋转角速度 ω_r ；

(3C) 通过所述定子两相静止坐标系下的定子电压 $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ 计算得到定子静止坐标系下的定子电压矢量位置角 θ_s ；再将该定子电压矢量位置角 θ_s 经过微分运算，得到同步旋转角速度 ω_s ；

(3D) 以所述定子电压矢量位置角 θ_s 为 Park 变换的变换角，对所述定子两相静止坐标系下的定子电压 $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ 进行 Park 变换，得到同步旋转坐标系下的定子电压 u_{sd} 、 u_{sq} ；

(3E) 将所述定子电压矢量位置角 θ_s 与转子位置角 θ_r 相减得到的 $\theta_s - \theta_r$ 作为 Park 变换的变换角, 对所述转子两相静止坐标系下的转子电流 $i_{r\alpha}$ 、 $i_{r\beta}$ 进行 Park 变换, 得到同步旋转坐标系下的转子电流 i_{rd} 、 i_{rq} ;

(3F) 将所述同步旋转坐标系下的定子电压 u_{sd} 、 u_{sq} 、同步旋转角速度 ω_s 、转子转速 ω_r 以及同步旋转坐标系下的转子电流 i_{rd} 、 i_{rq} 输入补偿项计算模块, 通过该补偿项计算模块依据公式 $u_{rqc} = -\omega_{sl}\sigma L_r i_{rd} - L_m \omega_{sl} u_{sq} / (\omega_s L_s)$ 和 $u_{rdc} = \omega_{sl}\sigma L_r i_{rq}$, 计算得到前馈补偿相 u_{rdc} 、 u_{rqc} ;

(3G) 将设定的转子电流参考量 i_{rd}^{ref} 、 i_{rq}^{ref} 与所述同步旋转坐标系下的转子电流 i_{rd} 、 i_{rq} 分别相减, 并进行 PI 变换后; 分别与所述前馈补偿相 u_{rdc} 、 u_{rqc} 相加, 得到同步旋转坐标系下的转子电压参考值 u_{rd}^{ref} 、 u_{rq}^{ref} ; 将该电压参考值 u_{rd}^{ref} 、 u_{rq}^{ref} 以 $\theta_s - \theta_r$ 为变换角进行反 Park 变换, 得到转子两相静止坐标系下的转子电压参考值 $u_{r\alpha}^{ref}$ 、 $u_{r\beta}^{ref}$;

(3H) 将所述转子电压参考值 $u_{r\alpha}^{ref}$ 、 $u_{r\beta}^{ref}$ 输入 PWM 发生器, 并根据所述直流母线电压 u_{dc} 产生 PWM 控制波, 驱动变流器。

4、如权利要求 3 所述的转子侧并网控制方法, 其特征在于: 所述步骤 (3F) 中补偿项计算模块通过下述步骤计算前馈补偿相 u_{rdc} 、 u_{rqc} :

所述同步旋转角速度 ω_s 与转子转速 ω_r 相减得到滑差频率 ω_{sl} ;

通过输入模块的同步旋转坐标系下的 q 轴定子电压 u_{sq} 、同步旋转坐标系下的 d 轴转子电流 i_{rd} 、同步旋转角速度 ω_s 和滑差频率 ω_{sl} , 按照公式 $u_{rqc} = -\omega_{sl}\sigma L_r i_{rd} - L_m \omega_{sl} u_{sq} / (\omega_s L_s)$ 计算前馈补偿相 u_{rqc} ;

通过输入模块的同步旋转坐标系下的 q 轴转子电流 i_{rq} 和滑差频率 ω_{sl} , 按照公式 $u_{rdc} = \omega_{sl}\sigma L_r i_{rq}$ 计算前馈补偿相 u_{rdc} 。

一种双馈异步风力发电机转子侧并网控制方法

技术领域

本发明涉及一种双馈异步风力发电机转子侧并网控制方法，特别是一种通过发电机转子侧软断开再重新投入手段，实现发电机在故障时可以不脱网运行的控制方法，属于风力发电技术领域。

背景技术

风力发电作为一种新型发电形式大规模接入电网，改变了传统以同步发电机为主的电力系统的稳定运行特性。随着风力发电的蓬勃发展，风电总装机容量迅速增长，单机容量不断增加，风力发电装机在电力系统总装机容量中所占的比例在不断增大，尤其在一些风能资源丰富、风电装机集中的地区，风力发电已经在当地电力系统中占有了重要的地位，成为了当地电网重要的功率注入节点，对当地乃至整个电力系统的正常稳定运行产生一定的影响。

但是，另一方面风电场的运行可靠性尚不能满足电力系统的要求。传统风力发电机正常运行时要求风电场端口电压的幅值、频率稳定，且三相正弦对称。如果风电场端口电压出现瞬时电压跌落的情况，风电机组将直接从电网切除，待系统恢复正常后再重新并网。这种策略虽然保护了风力发电机的安全，但是由于风电场从系统中切出会造成网内功率的不平衡，可能引起电力系统的不稳定，影响系统向负载供电的可靠性，因此从电力系统的角度来说，传统风力发电机的运行可靠性是不够的。

变速恒频双馈异步风力发电机系统因其所需变频器容量仅为发电机总容量的三分之一左右，可以大大降低制造成本，提高系统可靠性，已成为目前已安装的变速恒频风力发电系统的主流机型。然而，这种变速恒频双馈异步风力发电机同样存在上述发电机因故障出现瞬时电压跌落时，发电机由于脱网再并网的时间过长，无法满足电力系统对稳定性的要求。因此，本发明专门针对这种双馈异步风力发电机设计了一套转子侧并网控制方法，来解决这一问题。

发明内容

本发明的主要目的在于解决上述现有技术中存在的问题，提供一种通过发电机转子侧软断开再重新投入手段，实现发电机在故障时可以不

脱网运行的转子侧并网控制方法。

本发明的发明目的是通过下述技术方案予以实现的：

本发明的有益效果是：

1、采用该风力发电机转子侧并网控制方法，在保持双馈发电机不从电网脱离的情况下，实现从发电机转子侧并网，能够克服传统双馈发电机由于脱网再并网的时间比较长的缺点，满足电力系统对于风力发电机不间断运行的要求。

2、该转子侧并网控制方法仅通过改变控制策略实现，无附加的硬件设计，实现简单，不增加系统成本。

附图说明

图 1 是双馈异步风力发电机转子侧并网控制方法的流程图；

图 2 是以发电机为虚拟电网的等效电路示意图；

图 3 是转子侧并网控制算法控制框图；

图 4 是补偿项计算模块的计算框图。

具体实施方式

下面结合附图和实施例对本发明作进一步描述。

如前所述，对于现有的双馈异步风力发电机，当发电机因故障出现瞬时电压跌落时通常采取的控制策略是将风电机组直接从电网中切除，待系统恢复正常后再重新并网。但是，这种将发电机切出切入的故障控制方法会影响到当地电网的稳定性。并且，随着近年来风力发电机组在电网中所占比重的增加，这种影响也随之加剧。

另外，目前一般所采用的用以控制风力发电机与电网之间的连接或断开的开关器，主要是如接触器、断路器这样的机械式开关。然而，这种机械式开关在连接和断开的状态切换上往往需要较长的时长。这样就更加加剧了发电机组对电网稳定性的影响。

因此，本发明所设计的发电机转子侧并网控制方法就是针对现有风力发电机在故障控制方法上所存在的上述问题进行了改进。

对于双馈异步风力发电机，当其出现瞬时电压跌落时之所以需要及时地从电网中切除，是因为双馈异步风力发电机的定子与电网直接相连，电网电压骤降的瞬间，会引起很大的定子故障电流。通过定、转子的磁场耦合，较强的定子故障电流会进一步传输到转子上，使转子电流和电压大幅度升高，进而使转子产生很大的浪涌功率流向转子

侧变流器。一旦电网电压跌落深度较大，由此产生的浪涌功率远远超过转子侧变流器的容量，将会导致变流器损坏。同时，由于电网电压跌落，网侧变流器无法将转子侧变流器的能量传送给电网，这些额外的能量会给直流母线充电，导致直流母线电压急剧升高。可见，在发电机出现故障时对其实施脱网操作的最终目的实际上是为了保护发电机转子侧变流器。

本发明即是基于这点分析，设计了一种双馈异步风力发电机的转子侧并网控制方法，使其在发生瞬时电压跌落时通过发电机转子侧软断开手段对发电机转子侧变流器进行隔离保护，而使发电机仍然保持在线运行状态。这样就可以解决上述现有故障控制方法对电网稳定性的影响。而当发电机电压恢复正常后，只需控制发电机转子侧变流器输出电压与发电机转子电压相匹配，再重新恢复变流器对发电机转子的电压控制，即可恢复发电机的正常运作。

图 1 为本发明双馈异步风力发电机转子侧并网控制方法的流程图。如图所示，该转子侧并网控制方法具体包括如下步骤：

(1) 当发电机检测到电网电压跌落故障后，保持双馈异步风力发电机的定子侧与电网相连，封锁转子侧变流器；

这里所谓封锁转子侧变流器，就是控制单元停止向转子侧变流器的功率开关发送动作信号，使得双馈异步风力发电机的转子侧无电压输入。转子侧电压完全由定转子磁场的耦合获得。这样不仅可以对转子侧变流器进行隔离保护，而且这样的封锁控制完全由控制单元的动作信号控制，不涉及实际物理上的开关切换动作。

(2) 发电机检测电网电压是否仍然处于跌落；若是，则返回步骤(1)；若否，则转入步骤(3)；

(3) 解除对所述转子侧变流器的封锁；以风力发电机作为虚拟电网，采用转子侧并网控制算法启动转子侧变流器的控制；

当电网电压恢复正常时，解除对转子侧变流器的封锁，并以风力发电机的转子侧作为虚拟电网，实施转子侧并网控制算法使转子侧变流器的输出电压逼近转子电压的实时值。

(4) 当控制转子侧变流器输出电压与风力发电机转子电压相匹配时，恢复转子侧变流器对发电机转子的电压控制，实现转子侧并网。

通过上述本发明所设计的风力发电机转子侧并网控制方法，发电

机的定子侧在整个过程中始终与电网保持连接，而仅是通过对转子侧变流器采用封锁的软断开手段对发电机转子侧变流器实施保护。这样的控制方法既起到了保护发电机转子侧变流器的作用，又保证了发电机始终与电网连接，不会影响电网的稳定性。

并且，这里转子侧变流器与发电机转子之间的连接与断开控制是通过封锁转子侧变流器的软断开手段实现的。这种封锁转子侧变流器的软断开手段不同于前述接触器、断路器这样的机械式开关。它是由控制单元控制发电机转子侧变流器的 IGBT（绝缘栅双极晶体管）的开通和关断来实现变流器的投入和切出。因为 IGBT 的动作时间几乎可以忽略。相对而言，接触器、断路器这样的机械式开关动作时间长，无法实现不脱网运行的要求。

应当指出的是，对于上述双馈异步风力发电机的转子侧并网控制方法，其难点在于当检测到电网电压恢复后对转子侧变流器实施的转子侧并网控制算法。因为，脱离变流器控制的转子电压是在实时变化，如何使转子侧变流器逼近转子电压实时值，以最终实现转子侧并网，这点并非现有的一般并网控制算法所能实现的。

下面就对上述步骤（3）中所述的转子侧并网控制算法做更为具体的说明。

如上所述该转子侧并网控制算法并不同于一般变流器以稳定的电网电压为控制目标，而是以在实时变化的转子电压为控制目标。本发明的做法是将发电机转子看作一个虚拟的电网，通过调整变流器的并网控制算法，使转子侧变流器得以逼近转子电压实时值，以最终实现转子侧并网。

基于上述设计思想，本发明对于以发电机转子作为虚拟电网的并网控制模型进行了以下分析。

在同步旋转坐标系下，双馈发电机的动态数学模型为：

电压方程：

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + p\psi_{sd} - \omega_s \psi_{sq} \quad (1)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + p\psi_{sq} + \omega_s \psi_{sd} \quad (2)$$

$$u_{rd} = R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - \omega_{sl} \psi_{rq} \quad (3)$$

$$u_{rq} = R_r i_{rq} + p\psi_{rq} + \omega_{sl} \psi_{rd} \quad (4)$$

磁链方程：

$$\psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \quad (5)$$

$$\psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \quad (6)$$

$$\psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \quad (7)$$

$$\psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \quad (8)$$

式中， R_s, L_s 分别为定子绕组的电阻和自感， R_r, L_r 分别为转子绕组的电阻和自感， L_m 为定、转子绕组间的互感。 ω_s 为同步角速度， ω_{sl} 为滑差角速度， n_p 为电机极对数， p 为微分算子。相关量已折算到定子侧。

整理转子电压方程，可以得到：

$$u_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r p i_{rd} - \omega_{sl} \sigma L_r i_{rq} + L_m (p \psi_{sd} - \omega_{sl} \psi_{sq}) / L_s \quad (9)$$

$$u_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r p i_{rq} + \omega_{sl} \sigma L_r i_{rd} + L_m (p \psi_{sq} + \omega_{sl} \psi_{sd}) / L_s \quad (10)$$

由定子电压方程替换式 (9)、(10) 中的定子磁链微分项，得到：

$$u_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r p i_{rd} - \omega_{sl} \sigma L_r i_{rq} + e_{rd} \quad (11)$$

$$u_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r p i_{rq} + \omega_{sl} \sigma L_r i_{rd} + e_{rq} \quad (12)$$

其中：

$$e_{rd} = L_m (u_{sd} - R_s i_{sd} + \omega_r \psi_{sq}) / L_s$$

$$e_{rq} = L_m (u_{sq} - R_s i_{sq} - \omega_r \psi_{sd}) / L_s$$

则前馈补偿项：

$$u_{rdc} = \omega_{sl} \sigma L_r i_{rq} - e_{rd}$$

$$u_{rqc} = -\omega_{sl} \sigma L_r i_{rd} - e_{rq}$$

此时从转子绕组看过去，双馈异步风力发电机可等效为一个内阻为 $R_r + j\sigma\omega_{sl}L_r$ ，工作频率为滑差频率 ω_{sl} 的电压源 e_r ，若将 e_r 认为是电网电压， $R_r + j\sigma\omega_{sl}L_r$ 为滤波电抗器参数，其等效电路如图 2 所示。该系统可以认为是一个标准的三相 PWM 整流器，转子侧变流器发出一个可控电压 u_r ，通过调整 u_r 的幅值和相位，来控制电流 i_r 。与一般的整流器以稳定母线电压为控制目标不同，此时转子侧变流器通过控制转子电流的有功和无功分量来调节双馈异步风力发电机输出的有功和无功功率。

定子电压定向旋转坐标系下，双馈电机的定子电压 d 轴分量为零。通常情况下，定子电阻上的压降很小，可以从数值上进行忽略，据此可得到定子磁链的稳态近似值为：

$$\psi_{sq} \approx 0 \quad (13)$$

$$\psi_{sd} \approx L_m i_{ms} = \psi_s = U_s / \omega_s \quad (14)$$

据此对等效电压源 e_r 的表达式进行简化，有：

$$e_{rd} \approx 0 \quad (15)$$

$$e_{rq} = L_m \omega_{sl} u_{sq} / (\omega_s L_s) \quad (16)$$

此时，转子电流与定子功率之间的关系为：

$$P_s = -L_m u_{sq} i_{rq} / L_s$$

$$Q_s = -u_{sq} (u_{sq} / \omega_s - L_m i_{rd}) / L_s$$

可见，对同步旋转坐标系下转子电流 d 轴、q 轴分量分别控制，就可以实现对双馈异步风力发电机定子无功、有功功率的解耦调节。

根据上述以发电机转子作为虚拟电网的并网控制模型分析，设计得到前述步骤（3）中所述的转子侧并网控制算法。如图 3 所示，该转子侧并网控制算法具体包括如下步骤：

（3A）检测三相定子电压 u_a 、 u_b 、 u_c ，三相转子电流 i_{ra} 、 i_{rb} 、 i_{rc} ，转子位置角 θ_r 以及直流母线电压 u_{dc} ；

（3B）将所述三相定子电压 u_a 、 u_b 、 u_c 经过 3/2 变换得到定子两相静止坐标系下的定子电压 $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ ；所述三相转子电流 i_{ra} 、 i_{rb} 、 i_{rc} 经过 3/2 变换得到转子两相静止坐标系下的转子电流 $i_{r\alpha}$ 、 $i_{r\beta}$ ；所述的转子位置角 θ_r 经过微分运算，得到转子旋转角速度 ω_r ；

（3C）将所述定子两相静止坐标系下的定子电压 $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ 经过计算得到定子静止坐标系下的定子电压矢量位置角 θ_s ： $\theta_s = \arctan(u_{s\beta} / u_{s\alpha})$ ；再将该定子电压矢量位置角 θ_s 经过微分运算，得到同步旋转角速度 ω_s ；

（3D）以所述定子电压矢量位置角 θ_s 作为 Park 变换的变换角，对所述定子两相静止坐标系下的定子电压 $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ 进行 Park 变换，得到同步旋转坐标系下的定子电压 u_{sd} 、 u_{sq} ；

（3E）将所述定子电压矢量位置角 θ_s 与转子位置角 θ_r 相减得到的 $\theta_s - \theta_r$ ，以 $\theta_s - \theta_r$ 作为 Park 变换的变换角，对所述转子两相静止坐标系下的转子电流 $i_{r\alpha}$ 、 $i_{r\beta}$ 进行 Park 变换，得到同步旋转坐标系下的转子电流 i_{rd} 、 i_{rq} ；

（3F）将所述同步旋转坐标系下的定子电压 u_{sd} 、 u_{sq} 、同步旋转角速度 ω_s 、转子转速 ω_r 以及同步旋转坐标系下的转子电流 i_{rd} 、 i_{rq} 输入补偿项计算模块，通过该补偿项计算模块计算得到前馈补偿相 u_{rdc} 、 u_{rqc} ；

$$u_{rdc} = \omega_{sl} \sigma L_r i_{rq} - e_{rd}$$

$$u_{rqc} = -\omega_{sl} \sigma L_r i_{rd} - e_{rq}$$

其中：

$$e_{rd} \approx 0$$

$$e_{rq} = L_m \omega_{sl} u_{sq} / (\omega_s L_s)$$

（3G）将设定的转子电流参考量 i_{rd}^{ref} 、 i_{rq}^{ref} 与所述同步旋转坐标系下

的转子电流 i_{rd} 、 i_{rq} 分别相减，并进行 PI 变换后；分别与所述前馈补偿相 u_{rdc} 、 u_{rqc} 相加，得到同步旋转坐标系下的转子电压参考值 u_{rd}^{ref} 、 u_{rq}^{ref} ；将该电压参考值 u_{rd}^{ref} 、 u_{rq}^{ref} 以 $\theta_s - \theta_r$ 为变换角进行反 Park 变换，得到转子两相静止坐标系下的转子电压参考值 $u_{r\alpha}^{ref}$ 、 $u_{r\beta}^{ref}$ ；

(3H) 将所述转子电压参考值 $u_{r\alpha}^{ref}$ 、 $u_{r\beta}^{ref}$ 输入 PWM 发生器，并根据所述直流母线电压 u_{dc} 产生 PWM 控制波，驱动变流器。

这里，该转子侧并网控制算法与一般并网控制算法的主要区别在于对所述步骤 (3F) 中补偿项计算模块的具体计算公式进行了调整。在 u_{rdc} 、 u_{rqc} 的计算公式中补入了 e_{rd} 、 e_{rq} 作为了修正参数，使变流器的电压输出得以根据发电子转子进行调整。其中， e_{rq} 是一个与滑差频率 ω_{sl} 有关的量。与传统的控制算法相比，相当于电网电压的幅值在以滑差频率 ω_{sl} 变化着。

所述补偿项计算模块的具体计算框图如图 4 所示。如图所示，所述同步旋转角速度 ω_s 与转子转速 ω_r 相减得到滑差频率 ω_{sl} 。通过输入模块的同步旋转坐标系下的 q 轴定子电压 u_{sq} 、同步旋转坐标系下的 d 轴转子电流 i_{rd} 、同步旋转角速度 ω_s 和滑差频率 ω_{sl} ，按照公式 $u_{rqc} = -\omega_{sl}\sigma L_r i_{rd} - L_m \omega_{sl} u_{sq} / (\omega_s L_s)$ 计算前馈补偿相 u_{rqc} 。通过输入模块的同步旋转坐标系下的 q 轴转子电流 i_{rq} 和滑差频率 ω_{sl} ，按照公式 $u_{rdc} = \omega_{sl}\sigma L_r i_{rq}$ 计算前馈补偿相 u_{rdc} 。

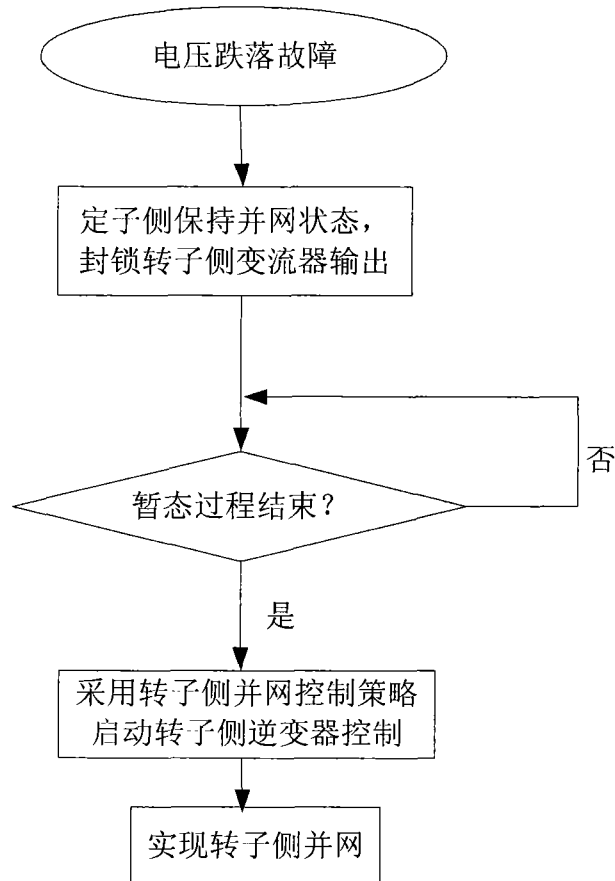


图 1

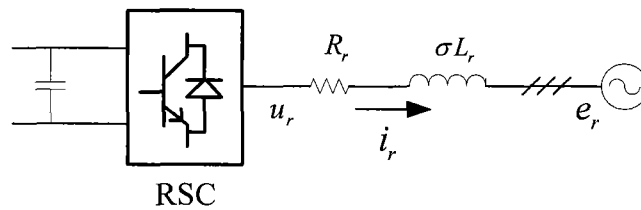


图 2

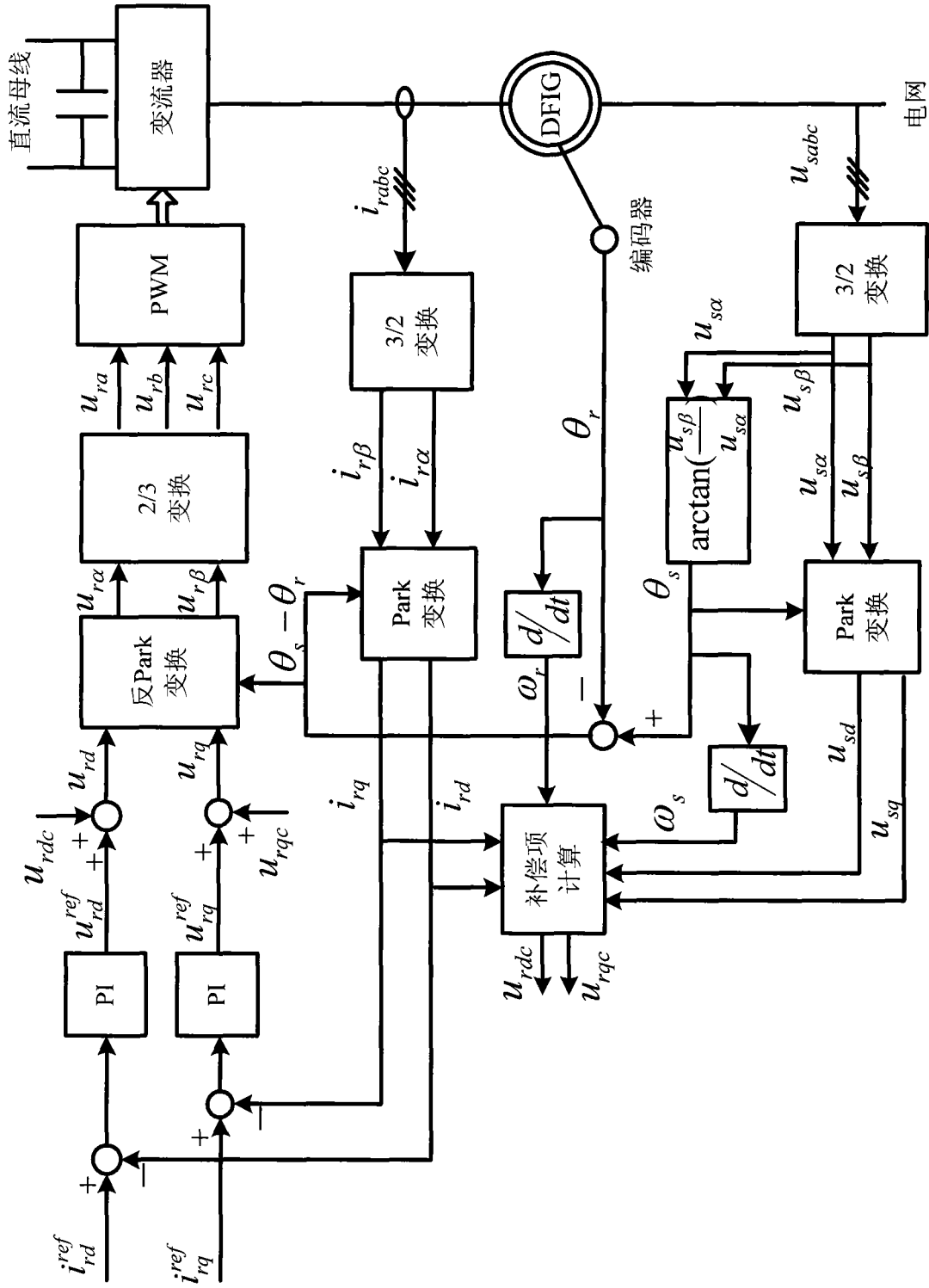


图3

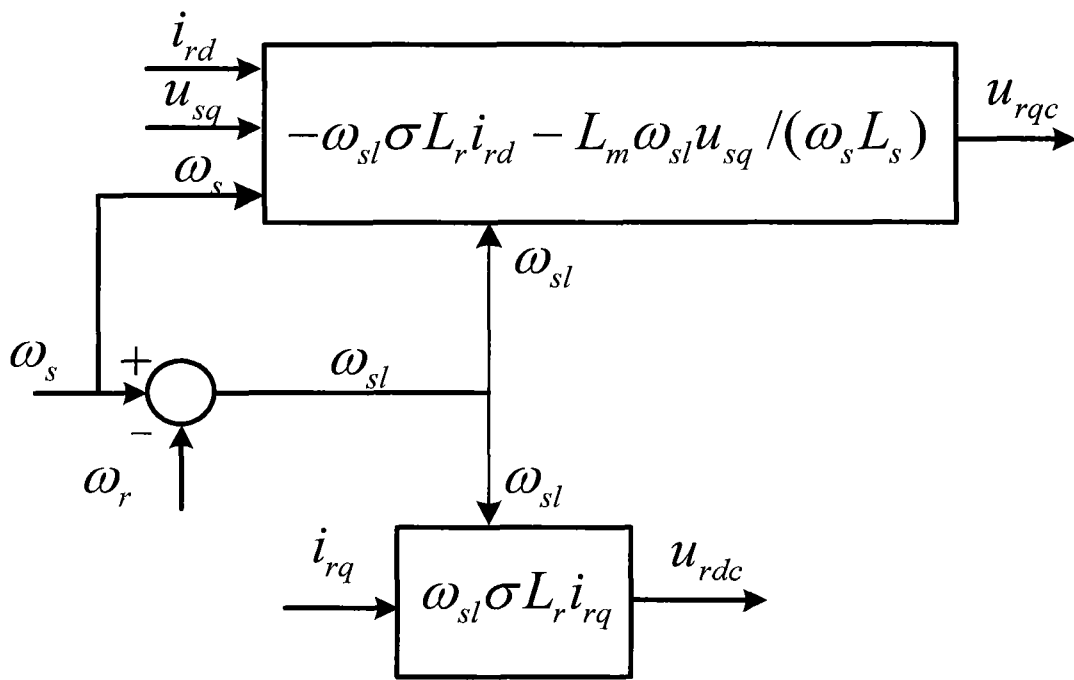


图 4