

[电动机]

电动机制动能量回馈电网仿真分析

文/广州电力设计院 配电部 徐 烁
广东电网公司汕头供电局 林烈鹏
华南理工大学广州学院 陈丽丹

介绍利用电动机制动能量现状，通过对制动能量回馈电网系统的工作原理、并网要求的分析后，提出能量回馈逆变器的电流解耦控制策略，并在MATLAB/Simulink环境下建模仿真，结果显示采用直接电流解耦控制方式制动能量回馈系统使制动能量回馈给电网，在重新利用机械能的同时，减少了电气设备的发热量，提高了控制系统的稳定性，同时降低了电能的消耗，从而实现控制的最优化以及能量利用的最优化。

工业生产中的许多动力设备，在运行过程中存在负发电过程，也就是负载在自身动能或者势能的作用下带动电动机转动，从而使电动机处于发电状态。通常情况下，这些电能由制动电阻白白消耗，没有得到回收利用。能量回馈节能系统把这部分能量回馈电网，从而大大减少能源浪费。

能量回馈系统的作用就是将原来消耗在制动电阻上的能量，通过逆变转化为交流电，并回馈到临近的同一电网或供其他电气设备使用。

制动能量利用现状

电动机断电后，由于惯性作用，自由停车时间较长。而某些生产工艺、过程则要求电动机在某一个时间段内能迅速而准确地停车。这时，就要对电动机进行相应的制动控制，使之迅速停车。

1. 制动电阻

地铁车辆、电梯、卷扬机无论采用传统的旋转电动机或直线电动机，其制动模式大多采用电气制动+空气制动互补的形式。

采用制动电阻或其改进方式，仍然遇到以下问题：①大量的电能变为热能白白逸散掉，与节能、环保的主题相悖。②置于地面的制动电阻成为新的城市热污染源。故这种方式只能在制动要求不

高的场合下使用。

2. 能耗制动

能耗制动方法是将正常运行的电动机，突然从电源上切断，并将电动机定子绕组任意两相出线端接到直流电源上。则直流电源将在定子内形成固定磁场，转子靠惯性旋转并切割此固定磁场，在转子绕组中感生电动势和转子电流，此电流与固定磁场相互作用，便产生电磁转矩，这个电磁转矩与转子转动方向相反，达到制动状态，转子动能消耗在转子电阻内。能耗制动电流小，但需要直流电源，设备造价较高。

3. 电容储能

电容类似蓄电池，用来作为储能媒介。具有能量储存和稳定电网电压双重功能。这两种技术在实际工程中都有应用，其能量流动只发生在直流牵引系统中，不涉及中压系统，故集中供电和分散供电方式都适用。

4. 逆变回馈方案

电动机运行过程中，如果外力使电动机转子加速，或人为控制定子频率降低，使转子频率高于定子频率，滑差 $S < 0$ ，电动机输出转矩与旋转方向相反，进入再生制动状态。这时能量回馈制动就将再生制动能量反馈给电网或给蓄电池充电。

能量回馈制动将制动产生的能量由逆变器输出，返回电网，因此属有源逆变。应当指出，通过控制逆变器的驱动信号，还可以调节输出电压或电流的幅值和相位，这样，就有可能实现输出电压和电源同步，输出“纯净”、无污染的电能。

逆变的唯一缺点就是产生较多谐波，所以需要采取相应的谐波治理措施。

能量回馈控制策略

实现直流回路与电源向的双向能量传递，一种最有效的办法就是采用有源逆变技术：即将再生电能逆变为与电网同频率同相位的交流电回送电网，从而实现制动。

1. 能量回馈原理

能量回馈系统在直流侧大电容中储存的直流电能转换为交流电，并回送到电网，系统的主回路结构如图1所示，主要由滤波电容、三相IGBT全桥、串联电感及一些外围电路组成。能量回馈系统的输入端与变频器的直流母线侧相连，输出端与电网侧相连。

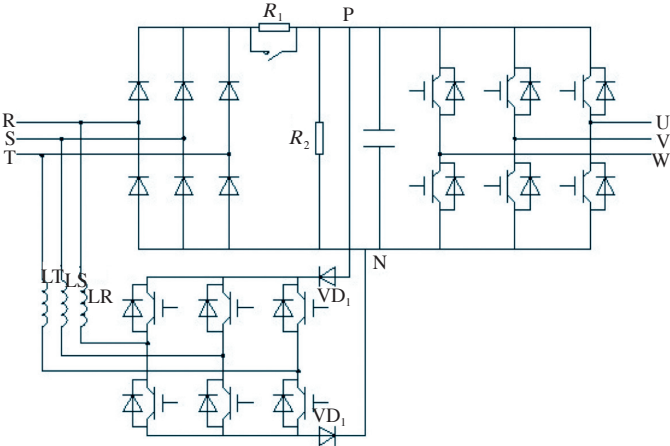


图1 能量回馈系统主回路结构图

系统的工作过程：当电动机运行时，有源逆变装置不工作，逆变器开关管全被封锁，处于关断状态；当电动机处于再生发电状态时，能量由电动机回馈电网，这时需启动有源逆变装置工作。在这里利用变频器直流侧电压 U_d 的大小来控制。其依据是当电动机处于电动状态时，变频器直流侧电压基本保持恒定，当电动机处于发电制动状态时，交流电动机的再生能量给变频器中间直流环节的储能电容充电，导致直流母线电压 U_d 升高，只要检测出 U_d 的大小，就能判断出电动机

的状态，从而进一步控制有源逆变装置。能量由电动机回馈直流侧导致直流母线电压超过电网电压峰值时，通用变频器整流桥由于承受反压而关断；当直流母线电压继续升高并超过启动有源逆变工作电压时，逆变器开始工作，将能量从直流侧回馈电网；当直流母线电压下降到关闭逆变器工作电压时，关闭有源逆变器。

因此在能量回馈过程中，系统要求在相位、电压、电流等方面满足如下控制条件：

- 1) 逆变过程必须与电网相位保持同步关系，且尽量在电网电压的高电压段向电网回馈能量。
- 2) 当直流母线电压超过设定值时，才启动逆变装置进行能量回馈。
- 3) 逆变电流必须满足回馈功率的要求，但不大于逆变电路所允许的最大电流。
- 4) 应尽量减少逆变过程对电网的污染。

2. 并网同步要求

能量回馈时，若并网，则系统不允许对电网造成污染，所以对并网电流、电压谐波要求如表1所示。

表1 并网电流波形技术指标

奇次谐波 n	(%)
$n < 11$	4.0
$11 \leq n < 17$	2.0
$17 \leq n < 23$	1.5
$23 \leq n < 35$	0.6
$35 \leq n$	0.3
总谐波THD	5.0

并网系统工作时，其相位、频率必须和电网电压同步，在系统和电网闭合之前还必须使电压幅值跟踪电网电压，当该三个指标符合表2所示的要求时，才允许闭合连接装置，使系统和电网连接工作。

表2 并网系统同步参数指标

容量 /kV·A	频率差 f/Hz	电压差 $V(\%)$	相位差 $\theta(^{\circ})$
0~500	0.3	10	20
>500~1 500	0.2	5	15
>1 500~10 000	0.1	3	10

3. 逆变器控制策略

有源逆变器是能量回馈装置的核心部分，需对其采取一定控制，从而保持中间回路直流电压在允许的偏差范围之内；同时使供电网或变压器一次侧的功率因数接近于1.0或-1.0。

对逆变器的控制主要集中在以下三个方面，即直流侧电压控制、PWM波的产生和交流侧电流

控制。

(1) 直流侧电压控制

将直流侧电压取样反馈，与给定参考电压比较，比较误差作为电压控制器的输入，输出作为交流侧电流幅度的给定，这是电压控制的基本结构。电压控制器的调节算法，目前还是以传统的PI居多，也有采用数字控制器的直接设计方法，取得了较好的效果。

(2) PWM波的产生

PWM信号的产生方法大都与交流调速系统基本相同，其主要差异是多一个电网同步与相位控制环节，而少一个变频控制环节。目前数字化PWM方法主要有规则采样法、空间电压矢量法等。此外，交流电流的控制环节经常是和PWM的产生融合在一起。目前，电流控制型PWM技术应用十分广泛，兼有电流控制器的作用，具有控制简单、动态响应快等优点。

(3) 交流侧电流的控制

要使PWM变流器工作时功率因数近似为1.0或-1.0，即要求输入电流为正弦波，且和电压同相位或反相，可以通过很多控制方法实现。根据是否引入电流反馈，控制可以分为两种：引入交流电流反馈的称为直接电流控制；没有引入交流电流反馈的称为间接电流控制。

电动机制动及能量回馈系统的MATLAB仿真

在MATLAB环境下搭建电动机自然制动、能耗制动仿真模型，设电动机带恒定负载转矩 $T = 1.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，在1 s后断路器断开，得到仿真结果曲线，转速曲线分别如图2和图3所示。

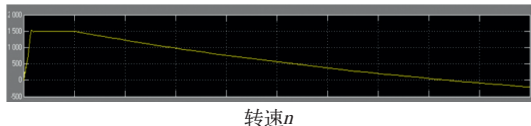


图2 自然制动仿真波形图

由图2可见，经过很短时间电动机转速就上升到额定速度。在1 s后断路器断开，电源切断，在电动机转动部分的惯性与各种阻转矩的作用下任其自行停车。电动机转速慢慢下降，停车耗时约10 s。

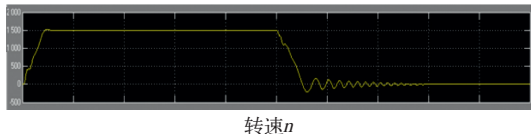


图3 能耗制动仿真波形图

由图3可见，在1 s后交流电源切断，直流电限流电阻通入定子绕组，进行能耗制动。在制动转矩的作用下电动机转速快速下降，再经过0.2 s电动机转速下降就接近0，其后转速就在0附近波动。

对比图2和图3可知电动机能耗制动比自然制动停下来的更快，具有较高的工作效率。但“能耗制动方式”即通过内置或外加制动电阻的方法将电能消耗在大功率电阻中，这样不仅将能量白白浪费掉，同时电阻产生的大量热量还会污染周围的环境。

在电动机变频器的直流母线直接引出回馈逆变端口，接上理想逆变器，通过逆变转化为交流电，并回馈到临近的同一电网或供其他电气设备使用。在理想状态下，视变频器母线为有源直流电源，经过理想逆变器的斩波逆变，再经过RLC滤波器的滤波作用，产生的电源波形相位、频率、谐波要求等基本符合并网的要求，如图4所示。

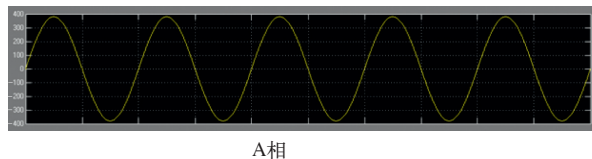


图4 直接逆变能量回馈制动仿真波形图

但现实中，由于电动机在不同工况下，电动机发电情况是随机变化，其他电路工作稳定性也不确定，只用理想逆变器逆变产生的三相电回馈电网是不符合要求的。本文引入电流解耦控制方式来控制整个能量回馈并网。

在高频环节并网逆变器中，为了获得最大功率回馈和滤除高频开关纹波电流， L 值并不大，因此在一定功率输出范围内，输入电流基波在 L 上的压降与电网相比很小，可近似认为逆变器输出电压与电网电压的幅值相等。基于该假设，提出了电流解耦控制。当电网电压或电路参数波动时，通过调节调制比 m 使输出电压幅值相等。并网电流是通过改变输出电压相位角调节，即输出电压的幅值依赖于电网电压和电路参数的波动，输出电压的相位依赖于并网电流的调节，从而使幅值和相位实现解耦控制，大大简化了控制。设三相电网电压波动为 $+15\% \sim -15\%$ ，经整流后，直流母线上可能出现的最高电压为

$$U_{dc} = \sqrt{3}U(1+0.15) \times \sqrt{2}$$

搭建仿真电路如图5所示。 $U_{dc} \approx 630$ V。设计预留30 V的裕量,因此设定回馈装置在电容电压为660 V时开

始工作,电压降到630 V时停止工作。仿真三相输出的波形如图6所示,电网侧三相电压波形如图7所示。

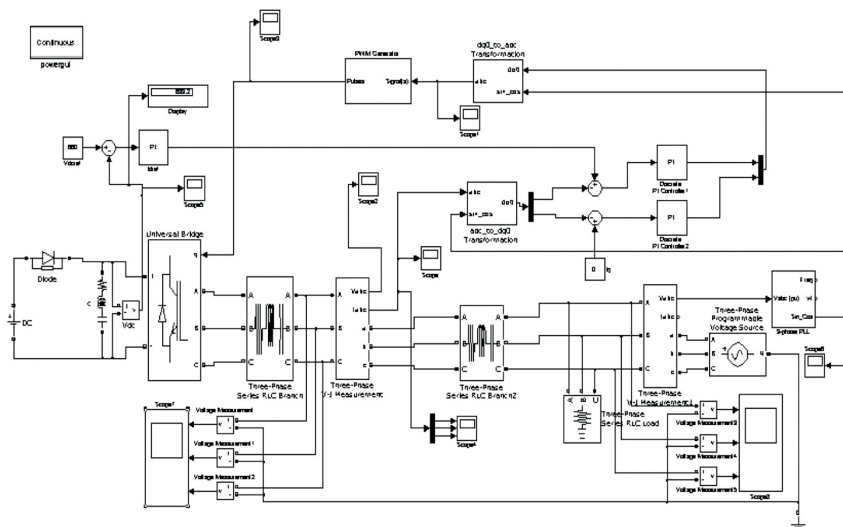


图5 电流解耦控制能量回馈系统仿真电路

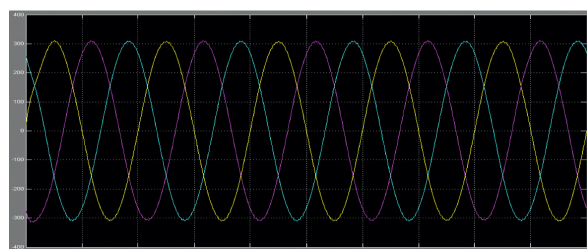


图6 仿真输出三相波形

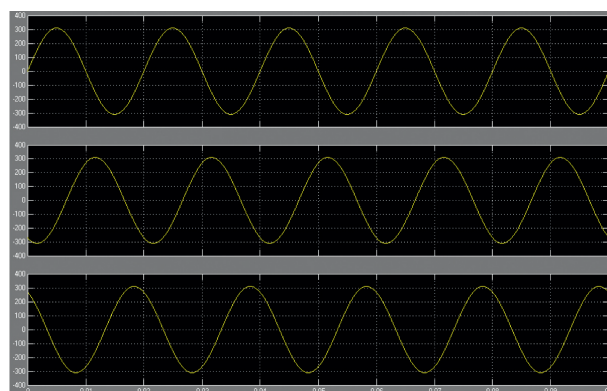


图7 电网侧三相电压波形

利用MATLAB的powergui控件对输出电压进行谐波分析,设置基波频率为50 Hz,采样时间为5个基波周期。A、B、C三相各电压谐波(THD)分别为0.80%、0.56%、0.59%,各谐波分量都很小,符合总谐波THD<5%并网要求。

结束语

本文针对能源紧缺、电动机节能的迫切需要,基于技术创新、节能环保的设计思想,在现有逆变技术

基础上,设计采用直接电流解耦控制方式制动能量回馈系统,利用MATLAB软件建立电梯能量回馈系统的仿真模型,对不同制动、控制方法进行仿真和分析比较,验证了电流解耦控制方式使得控制的最优化以及能量利用的最优化。电动机制动能量回馈系统能安全、有效地回馈能量,并且尽量减少逆变输出谐波含量,减少对电网的谐波污染和无功污染。EA

(收稿日期:2015.07.31)

(编辑:白文亭)