

基于双能量存储模式的电梯节能装置研究

作为一种势能性负载，周期运行的电梯引发大量的电能，在曳引机和变频器之间频繁地双向流动。采用类傅里叶变换，将由电梯自身状态发生改变而与外部交换的能量定义为暂态能量；将由电梯运输对象状态发生改变而与外部交换的能量定义为稳态能量。据此设计了采用双向直流变换器控制的由超级电容模组和蓄电池模组组成的双能量储存系统，分别用于存储和提供暂态能量和稳态能量，实现节能的目的。同时采用电压自动切换技术，实现电梯节能装置供电和电网供电两通道的无缝自动切换，使得节能装置的安装和使用不影响在用电梯的安全性和可靠性。理论分析和实验结果均证明所设计的基于双能量存储模式的电梯节能装置是可行和有效的。实验结果表明，本装置可为电梯节能45%以上。

林清华 张 琴 康 新/莆田学院机电工程学院

0 引言

作为高楼内必不可少的垂直交通工具，电梯给人们的生活带来了极大便利的同时，其数量也在逐年快速增长。据有关部门统计，截止2007年年底，我国在用电梯数量约为91.7万台^[1]，而到了2015年年底，我国在用电梯数量超过400万台^[2]，我国电梯保有量每年的增长率超过20%，形成巨大的规模效应。目前国内在用电梯的功率大多为5.5~27 kW，平均每台电梯每天的耗电量以66 kW·h计，则全国电梯每年约耗电963.6亿kW·h，超过三峡电站一年的发电量（2015年为870亿kW·h^[3]）。如此巨大的能耗引起大众，特别是专家界对电梯能耗的极大关注，并投入大量精力开展电梯节能研究

工作。电梯的节能研究主要有以下四个方面：

1) 电梯曳引驱动系统，采用先进的驱动方式，如永磁同步电动机直接驱动电梯曳引机，提升电梯的效率^[4]。

2) 电梯驱动控制系统，采用变压变频调速（VVVF）控制技术，提升电梯的效率和乘坐舒适性^[5-6]。

3) 电梯群控技术，研究多电梯的调度方法，以减少乘客候梯时间及实现节省能耗的目的^[7-10]。

4) 能量回馈系统，回收并利用电梯再生发电所产生的能量，降低电梯的能耗^[11-19]。

在这四种节能方式中，当前电梯的节能研究主要集中在电梯的群控技术和能量回馈系统节能这两方面。其中能量回馈系统的一个方向是将电梯再生能量直接逆变后回馈给电网，实现降低电梯能耗的目的^[11-13]。该方法结构简单，方案也比较成熟。但将电梯的再生能量逆变回电网后会影响到电网质量，如何降低其影响是个难题。同时，能量回馈回电网时的计费问题也需解决。能量回馈的另一个方向是通过储能装置将电梯的再生能量收集起来，当电梯工作在电动状态需要能量时，将储能装置中所收集的再生能量回馈给电梯使用，降低电梯从电网获取的能量总量，达到节能的目的^[14-19]。该方法将电梯再生能量存储在储能装置中，不再回馈给电网，因而不影响电网质量；同时该方法也不存在计费问题，是能量回馈方法中一种较优的解决方法，也是目前电梯节能研究



林清华/高级工程师

关键词/Keywords

双能量存储 ·
暂态能量 ·
稳态能量 ·
电梯 ·
节能 ·

福建省科技厅项目（2017J01711），福建省教育厅项目（JAT160445），莆田市科技局项目（2016G2022）。

的一个热点。但电梯的工作状态是随机的，如轻载上行的电梯工作在再生发电状态；此时若有多名乘客再搭乘电梯，则重载上行的电梯就会工作在电动状态；同一行程，电梯的工作状态就发生了改变。同时，电梯也可能工作于连续再生发电状态（下班高峰期）或连续电动状态（上班高峰期）。电梯工作情况复杂，难以准确预测电梯的运行状态，也就难以预测出电梯需要或释放出多少的能量，进而如何设计储能装置（超级电容、蓄电池的功率和容量各多大），以达到较优的节能效果以及合理的性价比是该方法的一个难点，这也是目前市场较少看见储能式电梯节能装置的原因。本文分析电梯及其运输对象在电梯运行过程中与外界交换能量的本质，采用类傅里叶变换，将电梯及其运输对象与外界所交换的能量分解为暂态能量和稳态能量，据此提出一种双能量存储模式的电梯节能方法。理论分析和实验结果均证明所设计的基于双能量存储模式的电梯节能装置的可行性和有效性。实验结果表明，本装置可为电梯节能45%以上。

1 电梯运行的暂态能量和稳态能量

如图1所示，曳引式电梯将轿厢和对重分别悬挂在曳引轮两侧（对重用于平衡电梯轿厢及部分乘客的重量，降低曳引机功率），通过驱动曳引轮的正反转实现轿厢和对重垂直升降运动，达到运输乘客或货物的目的。电梯服务时，电能与电梯及其运输对象的机械能（动能和重力势能）频繁地互相转换。电梯稳定运行，若电梯空载或轻载下行（对重侧重力势能的增加量大于轿厢侧重力势能的减少量）、重载上行时，电梯及其运输对象整体的重力势能增加，此时曳引机工作在电动状态，将电能转化为机械能。反之，电梯空载或轻载上行、重载下行时，电梯及其运输对象整体的重力势能减少，此时曳引机工作在再生发电状态，将所减少的重力势能转化成电能。但日常电梯运行时轿厢内的载荷状态及运行方向具有不确定性，电能和重力势能之间转换的方向和大小随载荷状态和运行方向的变化而不断变化。同

时，在电梯的起动和停靠过程，也产生电能和电梯整体动能之间的互相转换，其转换的大小和方向也不断变化。整体而言，电梯运行过程中，电能与机械能之间的转换的大小和方向取决于电梯运行时的状态，是个混沌的过程。

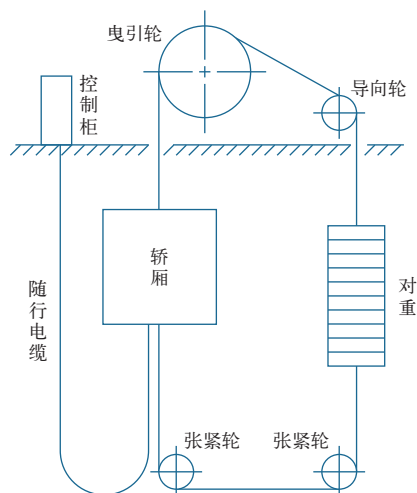


图1 曳引式电梯结构框图

但是，电梯具有其特殊性。电梯服务时轿厢沿固定轨道往返运行，是一种周期性运动。其运行过程不断将电能转化为电梯及其运输对象的机械能（电动状态）；或将机械能转化为电能（再生发电状态），能量的流动和变化趋势也带有周期倾向。本文采用类似傅里叶分析的方法，将电梯运行所引起的交换能量分解为暂态能量和稳定能量这两种能量模式。

暂态能量对应电梯自身状态改变所引起的能量交换部分。一部空载电梯上下全程运行一次（运行一个来回），考察电梯及其运输对象的首末状态，空载电梯还是在原先的位置，其状态未发生变化，所拥有的能量也没有变。空载电梯运行一周，电梯与外界交换能量的累积和为零，即电梯与外界没有发生能量转移。空载电梯运行一周时能量流动状况，上行时电梯工作在再生发电状态，对外释放出再生能量；下行时电梯工作在电动状态，对外吸收能量。理想情况下，空载电梯在发电状态发出的能量应该等于其在电动状态所消耗的能量，空载电梯运行一周，电梯与外界所交换能量的累积和为零，与电梯实际的能量状

态一致。但空载电梯运行过程中，不同位置的电梯，其能量状态在不断地改变，电梯也不断地与外界发生能量交换。此时，电梯由于自身状态发生改变而与外界所交换的能量称为暂态能量。根据上述设定可知，电梯上行时对外释放出暂态能量；下行时对外吸收暂态能量；电梯运行一个周期，暂态能量的累积和为零。

稳态能量是对应电梯运输对象状态改变所引起的能量交换部分。一名上班乘客从大楼的最底层乘坐电梯到达工作楼层后，在办公室开展工作，短时不再乘坐电梯，电梯空载返回大楼的最底层侯梯。考察电梯及其运输对象的首末状态，电梯的状态没有变化，其自身所拥有的能量没有改变；乘客位置由最底层变化到办公楼层，增加了其所在办公楼层高度所对应的重力势能，电梯及其运输对象的整体能量增加了。电梯需从外界吸收能量，转化为该名乘客在办公楼层所对应的重力势能。装载一名乘客的电梯运行一周时能量流动状态：上行时电梯工作在再生发电状态，对外释放出再生能量，但由于乘客的存在，电梯曳引机两侧重量差减少，其所释放的再生能量总量也少于空载上行的电梯；电梯下行时，是空载电梯下行，电梯工作在电动状态，对外吸收能量。运行一周，电梯在发电状态释放出的能量总量小于其在电动状态所消耗的能量总量，电梯与外界所交换能量的累积和不为零，少了电梯乘客在办公楼层所对应的重力势能，与电梯及其运输对象实际的能量状态一致。反之，该乘客从办公楼层下来，电梯上行时是空载电梯上行，释放出再生能量；下行时是轻载电梯下行，对外吸收能量，但其所吸收的能量总量少于空载下行的电梯。电梯在发电状态发出的能量总量大于其在电动状态所消耗的能量总量，电梯与外界所交换能量的累积和不为零，多了电梯乘客所减少的重力势能所对应的能量，与电梯及其运输对象实际的能量状态也一致。因此，电梯由于运输对象状态改变而与外界所交换的能量称为稳态能量。根据上述设定可知，对于电梯运输对象，电梯上行时对外吸收稳态能量；下行时对外释放出稳态能量；电

运行一个周期稳态能量的累积和为电梯运输对象重力势能的变化量所对应的能量总量。

电梯运行时与外界交换能量是暂态能量和稳态能量的代数和。电梯空载或轻载上行时，对外释放的暂态能量大于对外吸收的稳态能量，其代数和小于零，总体对外释放再生能量，电梯工作在再生发电状态；反之，电梯重载上行时，对外释放的暂态能量小于对外吸收的稳态能量，其代数和大于零，总体对外吸收能量，电梯工作在电动状态。下行的电梯具有类似的过程。一台实验用乘客电梯，其额定载重量为1 000 kg，速度为1.5 m/s，停靠层站为16层16站，提升高度为50 m，电梯的平衡系数为40%（对重比空载轿厢重 $1\,000\text{ kg} \times 40\% = 400\text{ kg}$ ），电梯的侯梯层设在1楼（即无人乘坐电梯时，电梯停靠在1楼侯梯）。为了分析方便，假设电梯传动是无损的，电梯起动后直接进入稳定运行状态，重力加速度取 10 m/s^2 。

（1）空载电梯来回运行一周

空载电梯从1层运行到16层时，对重由16层移动到1层。由于对重比轿厢重，电梯整体能量减少，对外释放出能量，此时电梯的功率和释放出的能量分别为

$$P_{0U} = FV = \Delta mgV = [(0 - 400) \times 10 \times 1.5] \text{ W} = -6\,000 \text{ W} \quad (1)$$

$$E_{0U} = FS = \Delta mgS = [(0 - 400) \times 10 \times 50] \text{ J} = -200\,000 \text{ J} \quad (2)$$

空载电梯从16层运行到1层时，对重由1层移动到16层。由于对重比轿厢重，电梯整体能量增加，对外吸收能量，此时电梯的功率和吸收的能量分别为

$$P_{0D} = \Delta mgV = [(0 - 400) \times 10 \times (-1.5)] \text{ W} = 6\,000 \text{ W} \quad (3)$$

$$E_{0D} = \Delta mgS = [(0 - 400) \times 10 \times (-50)] \text{ J} = 200\,000 \text{ J} \quad (4)$$

空载电梯从1层运行到16层，再返回1层，就首末状态而言，空载电梯的能量总量未发生改变，即电梯未与外界发生能量转移。空载电梯上行过程共向外界释放出200 000 J的再生能量，下行过程共从外界吸收了200 000 J的能量；整个运行过程，电梯及其运输对象的整体与外界交换能量的

累积和为 $(-200\ 000\text{ J}+200\ 000\text{ J})=0\text{ J}$ ，这与实际电梯的能量状态是吻合的。电梯上行到16层时，释放出最大暂态能量为 $200\ 000\text{ J}$ ，空载电梯的运输对象状态未发生变化，其稳态能量为零；运行过程中电梯与外界能量交换功率是 $6\ 000\text{ W}$ ，先向外界释放能量，再向外界吸收能量，运行一周总交换能量的累积和为零。

(2) 载客电梯简单运行一周

载客电梯上行，电梯从1层运载2名各重 75 kg 的乘客到8层办公（高 25 m ），此时电梯的功率和释放出的能量分别为

$$P_{2U} = \Delta mgV = [(75 \times 2 - 400) \times 10 \times 1.5] \text{ W} = -3\ 750 \text{ W} \quad (5)$$

$$E_{2U} = \Delta mgS = [(75 \times 2 - 400) \times 10 \times 25] \text{ J} = -62\ 500 \text{ J} \quad (6)$$

2名乘客的重力势能增加了

$$E_2 = \sum mgh = [(75 \times 2) \times 10 \times 25] \text{ J} = 37\ 500 \text{ J} \quad (7)$$

空载电梯从8层运行到1层时电梯吸收的能量为

$$E_{2D} = \Delta mgS = [(0 - 400) \times 10 \times (-25)] \text{ J} = 100\ 000 \text{ J} \quad (8)$$

电梯载客从1层运行到8层，再空载返回1层，就电梯及其运输对象的首末状态而言，电梯自身的能量未发生改变，但电梯运输对象——2名乘客由最底层变化到第8层，其重力势能增加了 $37\ 500\text{ J}$ ，电梯需要从外界吸收 $37\ 500\text{ J}$ 的能量。轻载电梯上行，共向外界释放出 $62\ 500\text{ J}$ 的能量；空载电梯下行，共从外界吸收了 $100\ 000\text{ J}$ 的能量，整个运行过程，电梯及其运输对象整体共向外界吸收了 $(-62\ 500\text{ J}+100\ 000\text{ J})=37\ 500\text{ J}$ 的能量，这与电梯及其运输对象实际能量状态的改变是吻合的。上行过程电梯与外界能量交换功率是 $-3\ 750\text{ W}$ ，与外界交换的能量是暂态能量和稳态能量的和，为 $-62\ 500\text{ J}$ ，下行过程电梯与外界能量交换功率是 $6\ 000\text{ W}$ ，与外界交换的能量是暂态能量 $100\ 000\text{ J}$ 。因此，运行到8层再返回1层的电梯，其暂态能量为 $100\ 000\text{ J}$ ，最终的稳态能量为 $37\ 500\text{ J}$ 。

(3) 载客电梯复杂运行一周

为方便分析，以货物代替乘客，电梯停止时高度刚好在整数米处。电梯从1层开始向16层运行

（上行），运输 600 kg 货物到 20 m 高处，卸下 300 kg 货物后继续运行至 30 m 高处，再装载 500 kg 货物运行至16层（ 50 m 高处）。电梯从16层开始向1层运行（下行），运输 200 kg 货物到 30 m 高处，再装载 300 kg 货物后运行至 20 m 高处，再装载 500 kg 货物运行至1层后卸出所有货物，运行一周结束。

电梯复杂运行一周后，电梯的运输对象——货物的重力势能改变了

$$\begin{aligned} E_3 = \sum mgh &= [600 \times 10 \times 20 + \\ & (600 - 300) \times 10 \times (30 - 20) + \\ & (600 - 300 + 500) \times 10 \times (50 - 30) + \\ & 200 \times 10 \times (30 - 50) + \\ & (200 + 300) \times 10 \times (20 - 30) - \\ & (200 + 300 + 500) \times 10 \times (-20)] \text{ J} \\ &= 20\ 000 \text{ J} \end{aligned} \quad (9)$$

即运输结束后，电梯运输对象的重力势能增加了 $20\ 000\text{ J}$ 。

上行过程中电梯与外界交换的能量为

$$\begin{aligned} E_{3U} = \sum \Delta mgS &= [(600 - 400) \times 10 \times 20 + \\ & (600 - 300 - 400) \times 10 \times (30 - 20) + \\ & (600 - 300 + 500 - 400) \times 10 \times (50 - 30)] \text{ J} \\ &= (40\ 000 - 10\ 000 + 80\ 000) \text{ J} \\ &= 110\ 000 \text{ J} \end{aligned} \quad (10)$$

电梯上行过程中共向外界吸收了 $110\ 000\text{ J}$ 的能量。

电梯下行过程中与外界交换的能量为

$$\begin{aligned} E_{3D} = \sum \Delta mgS &= [(200 - 400) \times 10 \times (30 - 50) + \\ & (200 + 300 - 400) \times 10 \times (20 - 30) + \\ & (200 + 300 + 500 - 400) \times 10 \times (-20)] \text{ J} \\ &= (40\ 000 - 10\ 000 - 120\ 000) \text{ J} \\ &= -90\ 000 \text{ J} \end{aligned} \quad (11)$$

电梯下行过程中共向外界释放了 $90\ 000\text{ J}$ 的再生能量。

电梯复杂运行一周后返回1层，就首末状态而言，电梯自身的能量没有变化，而运输对象的重力势能增加了 $20\ 000\text{ J}$ ，电梯需要从外界吸收 $20\ 000\text{ J}$ 的能量。复杂运行过程中，电梯与外界能量交换的大小及方向随载荷状态和运行方向的变化而变化。上行过程电梯先运行于电动状态，

从外界吸收能量，再运行于再生发电状态，对外释放再生能量，最后运行于电动状态，从外界吸收能量，电梯上行过程共向外界吸收110 000 J能量；下行过程电梯先运行于电动状态，从外界吸收能量；再运行于再生发电状态，对外释放再生能量；最后也运行于再生发电状态，对外释放再生能量，下行过程电梯共向外界释放90 000 J的再生能量。电梯运行一周，电动状态和再生发电状态频繁切换，运行情况比较复杂，能量也频繁地在电梯曳引机与变频器之间双向流动。但就电梯运行的整个周期而言，电梯及其运输对象的整体向外界吸收了 $(110\ 000\text{ J}-90\ 000\text{ J})=20\ 000\text{ J}$ 的能量，这与电梯及其运输对象实际能量状态的变化是吻合的。因此，将电梯及其运输对象与外界复杂的能量交换过程分解为暂态能量和稳态能量，分析过程就得到简化。电梯复杂运行一周，其暂态能量为200 000 J，最终稳态能量为20 000 J。上行过程电梯与外界交换的能量是暂态能量和稳态能量的和，为110 000 J；下行过程电梯外界交换的能量也是暂态能量和稳态能量的和，为-90 000 J。

上述实验用电梯其他极限参数，电梯在100%额定载荷时，曳引机两侧的重量差最大，此时电梯的功率为

$$P_{100} = mgV = [(1\ 000 - 400) \times 10 \times 1.5] \text{ W} = 9\ 000 \text{ W} \quad (12)$$

此时单行程电梯与外界交换的能量最大值为

$$E_{100} = mgS = [(1\ 000 - 400) \times 10 \times 50] \text{ J} = 300\ 000 \text{ J} \quad (13)$$

而电梯的最大稳态能量与电梯所服务大楼内的运输对象有关，为了简化说明，不失一般性，本实验电梯所服务大楼稳态能量折算如下：设定在16层有200个办公人员，并只有该层楼有人，每人重75 kg。则当这200人全部在16层时，该电梯运输对象最大的稳态能量为

$$E_{200} = mgh = (75 \times 200 \times 10 \times 50) \text{ J} = 7\ 500\ 000 \text{ J} \quad (14)$$

2 基于双能量存储模式的电梯节能装置工作原理

常用的电能存储装置有蓄电池和超级电容

两种。蓄电池通过电化学反应进行储能，其容量比较大，价格较低，大量应用于应急照明、不间断电源等场合。但蓄电池的使用寿命较短，一般只能反复充放电数百次，不适用于高频充放电的场合；同时功率密度低也是蓄电池储能的一个缺点。超级电容通过双电层和氧化还原赝电容电荷储存电能，其充放电是物理过程，因此其功率密度大，同时可反复充放电数十万次，使用寿命较长。但是超级电容的能量密度还比较低，同时价格较高，大容量储能时性价比较低。超级电容适用于大功率，小储能，且需要反复充放电的场合。

电梯运行过程中，将电梯及其运输对象与外界所交换的能量分解为暂态能量和稳态能量，可以很好地解决电梯运行状态复杂、难以预测的问题。电梯自身状态改变，电梯就与外界交换暂态能量，其暂态能量流动频繁，在变频器和曳引机之间频繁往返流动。但电梯运行一个周期，电梯与外界交换的暂态能量累积和为零。同时电梯的最大暂态能量有限，上文所用电梯最大的暂态能量为200 000 J。根据电梯暂态能量上述特性，结合电能存储装置特点，本文选用超级电容来存储电梯的暂态能量。电梯运输对象状态改变，电梯就与外界交换稳态能量。但电梯运输对象所对应的稳态能量流动缓慢，间隔较长的时间才在电梯变频器和曳引机之间流动一次。如一个人上班时搭乘电梯从1层到16层办公，之后就不再搭乘电梯，只有下班后才又搭乘电梯从16层下到1层。则该名乘客所对应的稳态能量在上班时由变频器流向曳引机，之后下班时再由曳引机流向变频器，其间隔时间很长。同时电梯运输对象所对应的稳态能量总量比较大，上文所用电梯最大的稳态能量为7 500 000 J，是最大暂态能量的37.5倍。据此，本文选用蓄电池来存储电梯的稳态能量，以取得较高的性价比和较小的体积。同时由于蓄电池充放电的反应是有损的，其使用寿命有限，本文采用两组蓄电池来存储和释放能量。一组用于充电，另一组用于放电，两组交替使用，延长蓄电池组的寿命。

综上，本文采用如图2所示的基于双能量存储

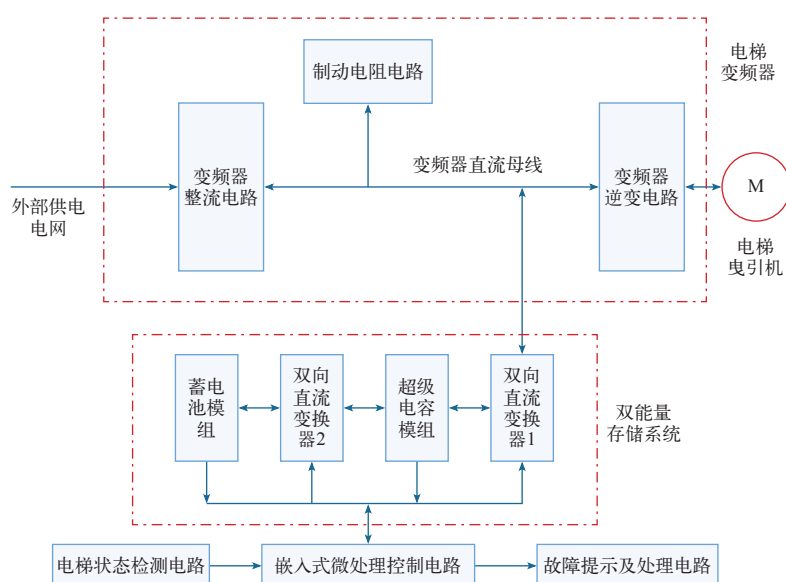


图2 基于双能量存储模式的电梯节能装置电路框图

模式的电梯节能装置。现有的电梯变频器常采用交流—直流—交流三级结构，将市电通过一个不可控的变频器整流电路整流后进入变频器直流母线，再通过变频器逆变电路逆变后，输出一个变频变压的交流电供给电梯曳引机使用。制动电阻用于消耗电梯的再生能量，防止变频器直流母线的泵升电压过高而影响电梯的正常使用。本文所设计的基于双能量存储模式的电梯节能装置并联接在电梯变频器直流母线的两端，其工作原理如下。

1) 电梯轻载上行，对外释放的暂态能量大于对外吸收的稳态能量；电梯重载下行，对外吸收的暂态能量小于对外释放的稳态能量，这两种状态电梯都工作在再生发电状态。电梯曳引机所发出的再生电能通过变频器逆变电路整流后，转变成直流电能存储在变频器的直流母线内。由于变频器整流电路阻止能量从变频器流向电网，制动电阻只有在直流母线电压达到设定电压后才接入，故再生电能堆积在变频器直流母线内。电梯状态检测电路检测到电梯工作在再生发电状态后，若超级电容模组内的能量低于设计值，则控制双向直流变换器1，驱动能量从直流母线流向超级电容模组，超级电容模组吸收电梯及其运输对象释放出的再生能量，如图3中的能量流1。若超

级电容模组内能量高于设计值，则关闭双向直流变换器1，变频器直流母线电压进一步升高后，达到制动电阻电路的动作电压，控制电路将制动电阻接入变频器直流母线，消耗电梯释放出的再生能量，防止变频器直流母线电压过高，保证电梯的正常使用，如图3中的能量流2。工作在能量流2状态的电梯不节能，但保证了电梯的正常使用。

2) 电梯重载上行或轻载下行时，电梯工作在电动状态，能量从变频器直流母线流向电梯曳引机，变频器直流母线的电压降低。电梯状态检测电路检测到电梯工作在电动状态后，若超级电容模组内能量高于设定值，则控制双向直流变换器1，驱动能量从超级电容模组流向直流母线，再流向电梯曳引机，供电梯使用，如图4中的能量流3；若超级电容模组内能量低于设定值，则关闭双向直流变换器1，直流母线电压进一步降低后，能量由电网通过整流桥后供给电梯使用，如图4中的能量流4。

3) 能量流3和能量流4的通道切换采取电压差自动切换技术，具体实现原理如下。电网为380 V三相交流电，通过整流桥整流后电压变成峰值为537.4 V的直流电。若变频器的直流母线电压低于537.4 V，则整流桥部分导通，能量从外部电网流进变频器。反之，若变频器的直流母线电压高于

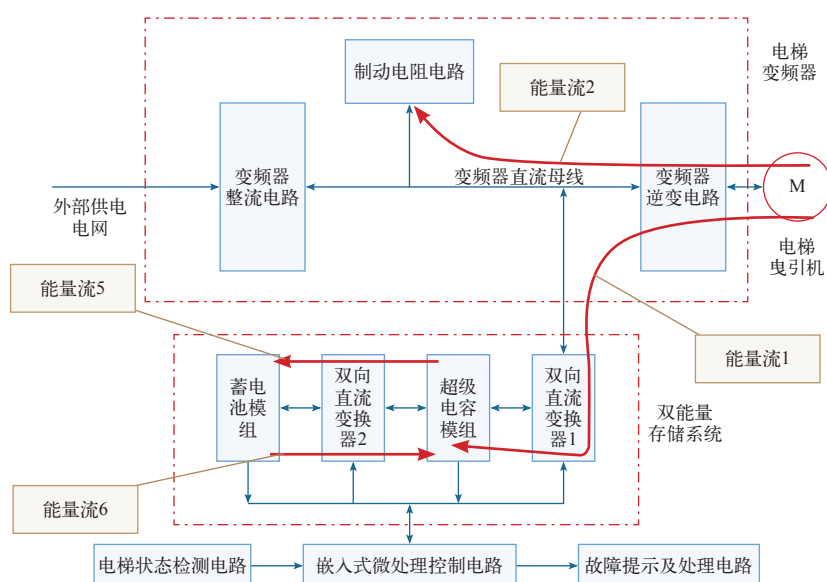


图3 电梯节能装置的储能模式

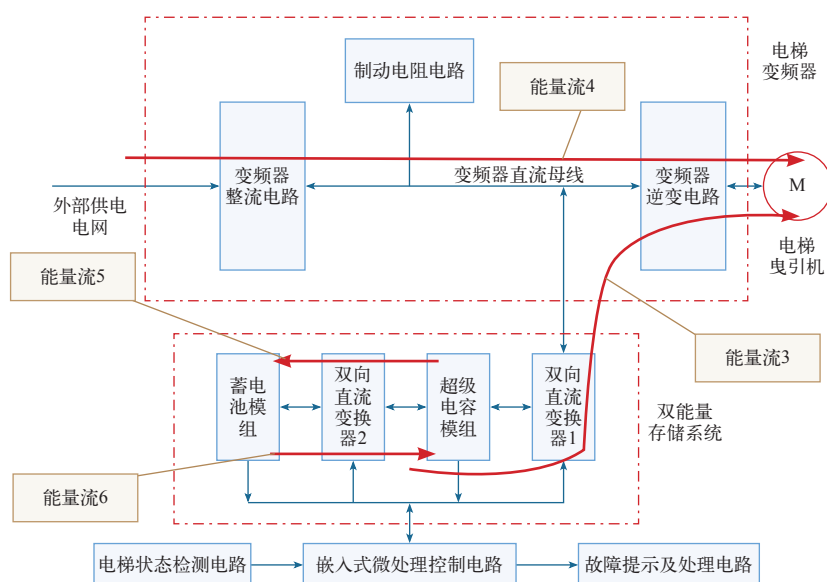


图4 电梯节能装置的释能模式

537.4 V，则整流桥反向截止，能量无法从外部电网流进变频器。本文监测超级电容模组的能量，若超级电容模组内的能量高于设定值，则通过双向直流变换器1将变频器直流母线的电压提升到537.4 V以上，使得变频器整流桥反向截止，电梯所需能量由储能装置提供。若超级电容模组内能量低于设定值，则关闭双向直流变换器1，变频器直流母线电压随能量输出掉落到537.4 V以下，自动切入电网进行供电。同样，若节能装置发生故障，同样通过关闭双向直流变换器1将节能装置从

电路中切除，电梯自动切入电网进行供电。采用电压自动切换技术，可有效实现电梯的节能装置供电和电网供电的无缝自动切换，使节能装置的安装和使用不影响电梯使用的安全性和可靠性。

4) 电梯带载上行时，电梯运输对象的重力势能增加，电梯需要向外界吸收稳态能量，控制电路根据电梯状态检测电路所检测的信息，控制双向直流变换器2，驱动对应的稳态能量从放电蓄电池模组流向超级电容模组，如图3和图4中的能量流6。此时电梯上行，电梯对外释放出暂态能量。

若电梯工作在轻载状态,电梯对外吸收的稳态能量小于对外释放的暂态能量,电梯工作在再生发电状态,储能装置中的超级电容模组通过双向直流变换器1吸收电梯释放出的再生能量。则轻载上行电梯,能量分别从放电蓄电池模组和电梯变频器两路一起流向超级电容模组,如图3中的能量流6和能量流1;若电梯重载上行,电梯对外吸收的稳态能量大于对外释放的暂态能量,电梯工作在电动状态,能量从放电蓄电池模组流向超级电容模组,同时能量从超级电容模组流向电梯变频器,如图4中的能量流6和能量流3。通过这两种方式,使超级电容模组中有足够的能量供电梯下行时所需。

5) 电梯带载下行时,电梯运输对象的重力势能减少,电梯需要向外释放稳态能量。控制电路根据电梯状态检测电路所检测的信息,控制双向直流变换器2,驱动对应的稳态能量从超级电容模组流向充电蓄电池模组,如图3和图4中的能量流5。此时电梯下行,电梯对外吸收暂态能量。若电梯工作在轻载状态,则电梯对外释放的稳态能量小于对外吸收的暂态能量,电梯工作在电动状态,储能装置中的超级电容模组通过双向直流变换器1提供电梯所需的能量。则轻载下行电梯,能量分别从超级电容模组流向充电蓄电池模组和电梯变频器,如图4中的能量流5和能量流3,若电梯重载下行,电梯对外释放的稳态能量大于对外吸收的暂态能量,电梯工作在再生发电状态,则能量从电梯变频器流向超级电容模组,同时能量从超级电容流向充电蓄电池模组,如图3中的能量流5和能量流1。通过这两种方式,使超级电容模组中有足够的空间存储电梯上行时释放出的暂态能量。

6) 双向直流变换器的设计。电梯节能系统中储能系统由蓄电池组和超级电容组混合组合而成,由于蓄电池模组、超级电容模组以及电梯变频器直流母线电压三者之间的电压差很大,因此需要设计两个双向变换器来连接蓄电池组、超级电容组以及电梯变频器的直流母线。一个双向变换器用于匹配蓄电池组与超级电容组的电压差,

另一个双向变换器用于匹配超级电容组与电梯变频器的直流母线电压的电压差。这两个双向变换器根据需要驱动能量在蓄电池组、超级电容组以及电梯变频器之间流动,实现电梯节能系统中能量储存的需要。由于整个节能系统的功率较大,本文所设计的变换器选择了如图5所示的电路作为系统的双向直流变换器。该变换器控制能量从直流母线流向超级电容模组时,为降压变换器(BUCK);反之则为升压变换器(BOOST)。电路拓扑中单个支路的功率为500 W, n 是根据实际电路需要的功率来决定的。例如需要10 kW的功率,则 n 可以取为20。同时,这些支路之间的控制采用交错控制的方法,以降低电压电流的纹波。

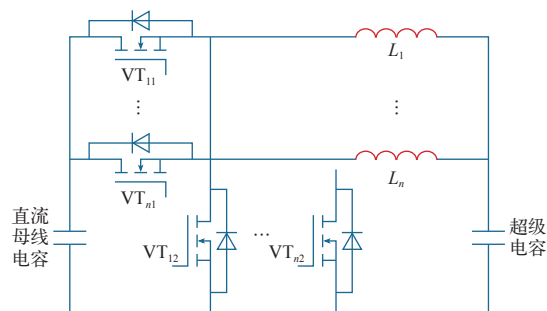


图5 双向直流变换器框图

3 实验验证

为了验证本文所提的基于双能量存储模式的电梯节能装置的有效性,设计了如下实验。测试电梯参数如下:电梯额定载重量为800 kg;额定速度为1.75 m/s;停靠层站为16层16站;提升高度54 m,电梯平衡系数为43%;电梯曳引机采用永磁同步电动机。电梯所在大楼共有人员120人,假设每个人重75 kg,平均分布在各楼层。

(1) 超级电容模组设计

根据市面上超级电容的容量和价格比,本文选用单个2.5 V, 600 F的超级电容来组建电梯节能装置中的超级电容模组。由于实验用电梯的平衡系数为43%,所以电梯满载全程运行时与外界交换的能量最多,为

$$E_C = \Delta mgS = [(800 - 800 \times 43\%) \times 10 \times 54] \text{ J} = 246\,240 \text{ J} \quad (15)$$

设计单个超级电容在一次充放电过程中电压变化为0.6~2.3 V, 则单个超级电容可储存的能量为

$$E_{C1} = 0.5 \times C \times (U_1^2 - U_2^2) = [0.5 \times 600 \times (2.3^2 - 0.6^2)] \text{ J} = 1479 \text{ J} \quad (16)$$

超级电容模组所需超级电容的个数为

$$t_C = \frac{E_C}{E_{C1}} = \frac{246\,240 \text{ J}}{1479 \text{ J}} = 166.5 \text{ 个} \quad (17)$$

加上安全的裕量, 本文采用300个超级电容分成两组并联组成, 每组150个超级电容串联在一起。此时超级电容模组的电压变化范围为90~345 V。

(2) 蓄电池模组设计

根据市面上蓄电池的容量和价格比, 本文选用单个12 V, 20 A·h的蓄电池来组建电梯节能装置中的蓄电池模组。当所有人员都在楼内时, 电梯所在大楼的稳态能量最大, 为

$$E_B = \sum mgh = [(75 \times 120 \times 10 \times 54) / 2] \text{ J} = 2\,430\,000 \text{ J} \quad (18)$$

单个蓄电池可储存的能量为

$$E_{B1} = UIt = (12 \times 20 \times 3\,600) \text{ J} = 864\,000 \text{ J} \quad (19)$$

蓄电池模组所需蓄电池的个数为

$$t_B = \frac{E_B}{E_{B1}} = \frac{2\,430\,000 \text{ J}}{864\,000 \text{ J}} = 2.8 \text{ 个} \quad (20)$$

加上安全的裕量, 同时延长蓄电池的寿命,

本文采用两组蓄电池构成蓄电池模组, 每组四个串联, 一组蓄电池用于充电, 另一组用于放电, 两组交替使用。

综上设计的基于双能量存储模式的电梯节能装置样机如图6所示。将所设计的电梯节能装置并联在电梯变频器的直流母线两端, 就可以实现电梯节能。



图6 电梯节能装置实物图

安装节能装置前后电梯的节能效果测试方案为: 在电梯变频器的进线处采用日本HIOKI公司生产的3169-20/21钳型功率计测试电梯所消耗的能耗, 电梯30%载荷运行一个来回, 比较电梯在接入本节能装置前后所消耗的能量。钳型功率计测得接入节能装置前后电梯的瞬时能耗如图7所示, 总能耗如下表所示。

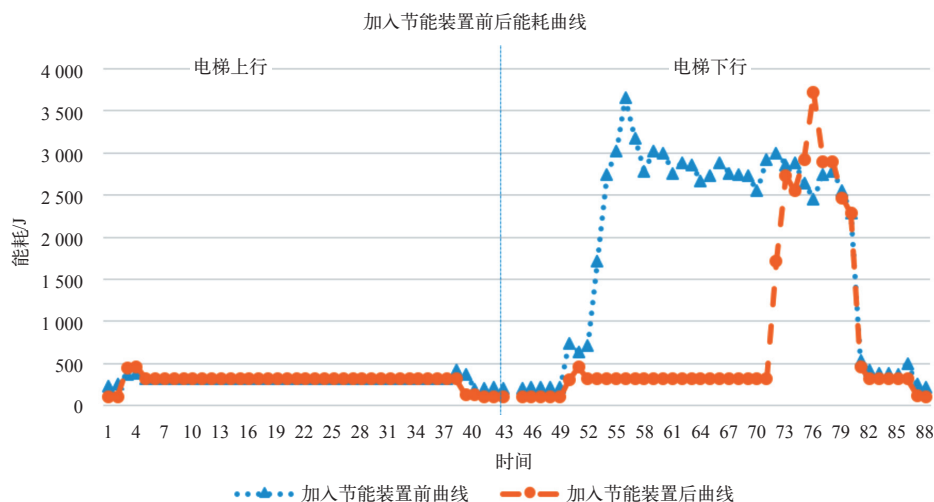


图7 电梯30%载荷来回一趟的瞬时能耗

表 电梯接入节能装置前后总能耗数据

	接入节能装置前	接入节能装置后
上行能耗/J	13 359	12 937
下行能耗/J	84 089	40 616
总能耗/J	97 448	53 553

实验结果显示,电梯30%载荷上行,对外吸收的稳态能量小于向外释放的暂态能量,电梯工作在再生发电状态。从图6可以看出,对于工作在再生发电状态的电梯,接入节能装置前后的能耗曲线基本重合;从上表也可以看出,两者的能耗分别为13 359 J和12 937 J,基本相等。原因分析如下:对于接入节能装置之前的电梯,由于变频器前端整流桥的单向导通性,电梯的再生能量通过耗能电阻消耗掉,此时电梯上行的能耗主要是控制电路和轿厢照明等消耗的能量。对于接入节能装置之后的电梯,再生能量通过双向直流变换器储存在节能装置内。但由于节能装置并联在变频器直流母线两端,电梯其他部件的供电还是通过市电进行供电,因此电梯上行的能耗也是由于电梯的控制电路和轿厢照明等消耗的能量,与接入节能装置之前类似。同时电梯上行所发出的再生能量存储在储能装置中,未反馈回电网,不影响电网的质量,也不存在计费问题。

电梯30%载荷下行,对外释放的稳态能量小于向外吸收的暂态能量,电梯工作在电动状态。从图6可以看出,对于工作在电动状态的电梯,接入节能装置前后的能耗曲线的差别比较大。接入节能装置之前的电梯,电梯无节能措施,所消耗的能量全部由电网供电,电梯共消耗84 089 J的能量。接入节能装置之后,由于储能装置存储有电梯上行释放出的再生能量,故在电梯下行的前半段,由节能装置提供电梯所需的能量,此过程的能耗为电梯的控制电路和轿厢照明等消耗的能量;储能装置中的再生能量消耗完后,通过电压自动切换技术,无缝切换到电网供电,不影响电梯的安全和使用性能。电梯共消耗40 616 J的能量,少于接入节能装置之前的84 089 J。

综上,电梯30%载荷上下运行一周,接入基于双能量存储模式的电梯节能装置后,电梯共消耗

53 553 J的能量,与接入节能装置之前的97 448 J相比,共节省电能43 895 J,具有较强的节能效果。

4 结束语

作为一种势能性负载,电梯轻载上行和重载下行时都对外释放出再生能量,如何有效地利用好这部分再生能量是当前电梯节能研究的一个热点。本文采用类傅里叶方法,将电梯运行过程与外界所交换的能量分解为暂态能量和稳态能量,暂态能量对应电梯自身状态改变所引起的能量交换部分;稳态能量对应电梯运输对象状态改变所引起的能量交换部分;电梯与外界所交换的能量是暂态能量和稳态能量的代数和。据此,提出一种基于双能量存储模式的电梯节能装置,采用超级电容模组来存储电梯的暂态能量,蓄电池模组存储电梯的稳态能量。同时采用电压自动切换技术来实现节能装置供电和电网供电之间的无缝链接。理论分析和实验结果均证明了基于双能量存储模式的电梯节能装置的可行性和有效性。同时电梯上行所发出的再生能量存储在储能装置中,未反馈回电网,也就不影响电网的质量,也不存在计费问题。实验结果表明,基于双能量存储模式的电梯节能装置可为电梯节能45%以上。

参考文献

- [1] 中国电梯编辑部. 2008年我国在用电梯数量统计报告[J]. 中国电梯, 2009(10): 27-44.
- [2] 南方. 全国电梯总量超过400万台[N]. 深圳特区报, 2016-1-7(A14).
- [3] 文小浩, 高玉. 2015年三峡电站年发电量870亿度[N]. 中国能源报, 2016-1-11(11).
- [4] International Organization for Standardization. Energy performance of lifts, escalators and moving walks – part 1 energy and conformance [S]. TC 178/WG10, 2010.
- [5] Almeida A D, Hirzel S, et al. Energy-efficient elevators and escalators in Europe: an analysis of energy efficiency potentials and policy measures [J]. Energy and Buildings, 2012, 47(47): 151-158.

- [6] Tuka T, et al. Evaluating and improving the energy efficiency of counterbalanced elevators based on passenger traffic [C]. Sixteenth IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2016 : 1-6.
- [7] 赵伟, 王志磊, 等. 基于客流分析的电梯群控仿真系统研究 [J]. 控制工程, 2015 (5) : 826-830.
- [8] 刘耀武, 聂风华, 等. 具有时间约束的电梯节能调度算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2013 (9) : 2339-2346.
- [9] 郎曼, 李国勇, 等. 电梯群控系统的节能调度优化仿真 [J]. 计算机仿真, 2017 (2) : 375-379.
- [10] 蔡晓霞, 俞立峰. 群控电梯目的层调度系统的设计 [J]. 浙江工业大学学报, 2015 (1) : 52-57.
- [11] 马祎炜, 李杰, 等. 基于改进型幅相控制的单位功率因数电梯能量回馈器研究 [J]. 电工电能新技术, 2008 (1) : 76-80.
- [12] Marsong S, Plangklang B. Implementation analysis of an elevator energy regenerative unit (EERU) for energy saving in a building [C]. 2016 13th International Conference on ECTI-CON, 2016: 1-5.
- [13] 申瑞, 张自强, 等. 电梯节能能量回馈控制系统设计 [J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2010 (1) : 27-30.
- [14] 宫成, 焦然, 等. 超级电容在电梯节能中的应用 [J]. 电气应用, 2014 (22) : 53-58.
- [15] Jabbour N, Mademlis C. Improved control strategy of a supercapacitor-based energy recovery system for elevator applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (12) : 1-1.
- [16] Jabbour N, Mademlis C. Supercapacitor-based energy recovery system with improved power control and energy management for elevator applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017 (99) : 1-1.
- [17] 冀国郡, 王云亮. 基于模糊控制策略的超级电容节能电梯研究 [J]. 电源技术, 2016 (8) : 1673-1674.
- [18] 罗志群, 万健如, 等. 超级电容储能式电梯应用研究 [J]. 电机与控制学报, 2015 (6) : 55-60.
- [19] Xun Q, Wang P, Quan L, et al. Research on control strategy of super capacitor energy storage system in traction elevator [C]. International Conference on Engineering Science and Management, 2016: 160-164.
- (收稿日期: 2017-04-24) **EA**

(上接第41页)

- [3] 魏伟, 倪颖婷, 罗凤章, 等. 基于热网互联的电力系统灵活性调度模型 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37 (6) : 164-170.
- [4] 马建伟, 葛挺, 荆百林, 等. 热电联产机组的节能发电调度技术研究与实践 [J]. 中国电力, 2009, 42 (4) : 14-17.
- [5] 龙虹毓, 徐瑞林, 何国军, 等. 基于热风电协调调度的系统日调峰能力分析 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33 (4) : 30-34, 54.
- [6] 陈巨龙, 赵翔宇. 多时序协调的发电调度系统开发与应用 [J]. 南方电网技术, 2014, 8 (6) : 78-82.
- [7] 李翔, 赵翔宇, 辛阔, 等. 南方电网调度综合计划管理与评估系统研发 [J]. 南方电网技术, 2014, 8 (2) : 109-112.
- [8] 丁恰, 王岗, 唐然, 等. 日发电计划安全校核系统开发与应用 [J]. 江苏电机工程, 2013, 32 (1) : 9-12.
- [9] 王永庆, 张宏, 苏耕, 等. 热电联产机组节能发电组合研究 [J]. 电网与清洁能源, 2013, 29 (12) : 45-49.
- [10] 王冠群, 刘锋, 梅生伟, 等. 合同电量优化分解模型及算法 [J]. 电机与控制学报, 2012, 16 (7) : 58-64.
- (收稿日期: 2017-09-11) **EA**