# 生产加工企业稳压策略的研究

对于一些生产加工企业，由于产品的准确度对电压波动比较敏感，因此电网中的谐波畸变以及电压跌落等电能质量问题就会影响到产品的合格率，降低企业效益。针对重庆国际复合材料有限公司的电压暂降从而导致废品率增大的问题，提出几种解决方案。经过仿真调试，最后提出在运行电动机机端并联静止无功发生器（SVG）来实现稳压策略。

欧　勇／国网重庆市电力公司长寿供电分公司调度中心
邓帅荣　杨　桦　罗　建／输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室（重庆大学）

欧　勇／工程师

关键词／Keywords
电能质量·
稳压策略·
SVG·

## 0　引言

电压暂降是电力系统的一种突出的电能质量问题。由于以往的绝大多数用电设备对电压的短时变化不敏感，该问题并未引起人们的关注。随着用电设备的技术更新，电力系统中的负荷类型越来越多，其中一些敏感设备的运行严重受到电压暂降的影响[1]。在电力系统中，电力故障是难以避免的，电力系统故障往往会造成电网电压幅值短时间内出现大幅降落，对敏感设备的正常运行产生影响，从而造成严重的经济损失和社会影响。

近些年，在各种电能质量问题中，电压暂降时是造成电压敏感设备不能正常工作的主要原因，通常可以认为，电压暂降可引起70%～90%的电能质量问题[2]。欧洲某电力部门的调查结果显示，在由电能质量引起的用户投诉中，由电压暂降引起的投诉占80%以上，而由谐波、开关操作过电压等引起的投诉不到20%[3]。可见，电压暂降已成为最重要的电能质量问题，是信息社会对供电质量提出的新挑战。因此，为了减少电压暂降对经济社会带来的危害，对电压暂降进行分析计算具有极其重要的现实意义[4]。

## 1　工程案例

由电力系统故障导致的电压暂降已威胁许多重要用户的供电可靠性。位于重庆市长寿经济技术开发区的重庆国际复合材料有限公司（以下简称“国复厂”）是中国三大玻纤生产基地之一。拥有40 000 t/年规模的ECR玻璃纤维生产线，可向客户提供一系列具有良好耐化学腐蚀性的ECR玻璃纤维制品。该公司致力于生产品质稳定的玻璃纤维产品。而该公司F10生产线自投产以来，产品优质率一直偏低。F10线的生产现状已经给分厂带来极大的质量及成本压力。其中漏板电压暂降引起的TEX问题是造成产品质量降低的主要原因。近年来，由于电压暂降较大，导致F10生产线漏板跳闸频繁。电压暂降主要是在一定时候突降，每天的11：40和22：40时段会突降一次，降幅最多达18 V；瞬间电压暂降过大，导致漏板降温速率过快，负载电流增大，从而导致漏板跳闸。

## 2　原因分析

按电压暂降的产生区位不同主要可以分为三类：系统侧故障或短路引起的电压暂降；用户内部线路或供电设备故障所引起的电压暂降；外界大负荷设备起动引起的电压暂降。导致电压暂降的原因非常复杂，有自然因素，也有人为因素，有供电系统保护的因素，也有设备等因素。自然因素主要包括雷击、台



(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

风、暴雨和冰雪天气等。人为因素包括保护误操作、人为外力破坏等。

经过对国复厂的配电网进行实地考察，对其系统接线图以及局部接线图进行分析，得出以下等效电网模型，如图1所示。

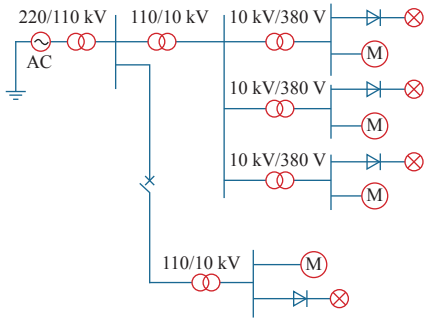



图1 国复厂等效配电网模型

在上述等效电网模型中，AC交流电压源用来模拟大电网，其输出220 kV三相交流电，经过220/110 kV降压变压器之后进入不同的生产企业。进入国复厂之后，经110/10 kV变压后，下接到不同的生产线，在每个生产线又经10 kV /380 V变压后接入机器设备和厂用其他负荷，包括很多非线性负荷，用整流之后接负载代替。综上所述，国复厂的配电网模型基本与实际一致。

电压暂降表现为：在380 V侧电压有波动以及畸变；在每天的特定时间，380 V侧和110 kV侧电压发生跌落。

分析电压暂降的原因，有以下两点：

1）国复厂自身非线性负荷的接入，以及拉丝电动机在运行过程中由于受熔炉温度的影响和原料投放、漏板的堵塞导致负荷不是稳定的，使得380 V侧电压有一些波动和畸变。

2）经过对国复厂周边工厂和企业的调查，获知重钢生产企业在炼钢时负荷的投入对其影响很小，而永航在上述对应的时间有大负荷投入电网运行，使得110 kV级电压瞬间跌落，之后电压会抬升，但稳态偏差超过10%，造成欠电压，影响到国复厂拉丝电动机机端380 V级电压跌落至360 V左右，如图2所示。

永航厂对国复厂的影响，其等效电路如图3所示。图3中，$r$为电网、高压电力变压器以及线路的

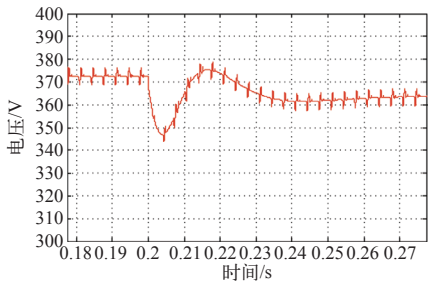



图2 国复厂电压跌落波形

分布参数，即等效电网内阻；$R_1$、$M_1$代表永航厂的各类负荷；$R_2$、$M_2$代表国复厂的各类负荷。在开关闭合时，即永航厂生产投入运行，电路母线电流增大，由于$r$的存在，产生的电压暂降使得国复厂的供电电压降低，即上述原因2）的机理。

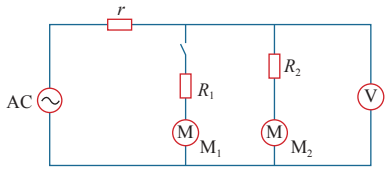



图3 国复厂电压跌落机理图

## 3 解决方案

现阶段的稳压措施主要有以下几个方面：采用电压补偿型装置；在主受开关加装失压脱扣装置；高压供电安全防护墙。电压补偿装置主要包括动态电压恢复器（DVR），不间断电源（UPS）以及无功功率电源。但DVR投资大，技术复杂。在大容量负荷时，UPS的使用需要配合大容量电池组，由于电池组电能储备限制，UPS不能长时间实现稳压作用，且较长时间供电的UPS存在散热问题需要解决。对于在主受开关加装失压脱扣装置的措施，该方法在双回路供电的低压主受开关上加装失压脱扣装置，当在两个主受开关互锁时，其中一个回路因故障出现电压暂降，另一回路可在1 s内恢复供电。但此种方式仍会出现短时的电压暂降，对于敏感负荷仍有一定的影响。高压供电安全防护墙主要通过调整出线回路，使故障率高的回路不在同一主变压器，统一校验区域继电保护，减小故障数目和缩短故障切除时间等方面减少电压暂降的发生概率，但是其不能从技术



(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

上解决发生电压暂降后的电压稳定问题。

在电力系统中，对无功功率的控制是非常重要的。通过对无功功率的控制，可以提高功率因数，稳定电网电压，改善供电质量。随着电力系统的发展，对无功功率进行快速动态补偿的需求越来越大。传统的无功功率动态补偿装置是同步调相机，由于是旋转电动机，因此损耗和噪声都比较大，运行维护复杂，而且响应速度慢，在很多情况下已经无法适应快速无功功率控制的要求。随着电力电子技术的进一步发展，20世纪80年代以来，一种更为先进的静止型无功补偿装置出现了，这就是采用自换相变流电路的静止无功补偿装置，即静止无功发生器（Static Var Generator，SVG），简称为静止补偿器（STATCOM）。因此，有必要针对敏感负荷受电压暂降影响的问题提出一种基于电力电子技术、晶闸管控制进行动态无功补偿的装置，既能可靠快速检测识别电压暂降，又能在出现电压暂降时通过SVG进行无功补偿，实现电压稳定[5-6]。

根据无功补偿策略进行稳压，目前有以下几种方式。

### 3.1 并联电容

取在第一组电动机机端处并联电容，运行电路后，机端电压变化情况如图4所示。

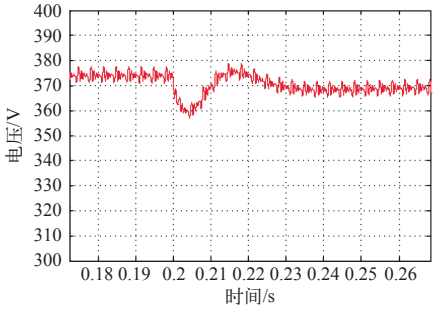



图4 并联电容后380 V电压波形

分析上述电压变化情况，与图2比较可知：在拉丝电动机端口并联电容以后，使得380 V侧电压跌落得较之前缓慢。此外，并联电容之后，谐波问题变得严重，高次谐波明显增多。

### 3.2 并联电感

同样，在第一组拉丝电动机机端处单独并联电抗器，380 V侧电压波形如图5所示。

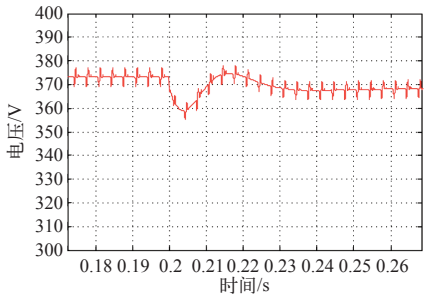



图5 并联电感后380 V电压波形

与图2比较，可以得到以下结论。并联电感可以明显改善380 V侧电压的波形，使得谐波幅值明显降低，电压相对更加稳定。与图4比较，谐波也得到明显的改善，不过在补偿无功和稳压的效果来看，单独并联电感不如并联电容稳定。

### 3.3 并联电感和电容

综合以上两种方案，采取在异步电动机（拉丝电动机）机端同时并联电感、电容。经仿真运行，电压波形如图6所示。

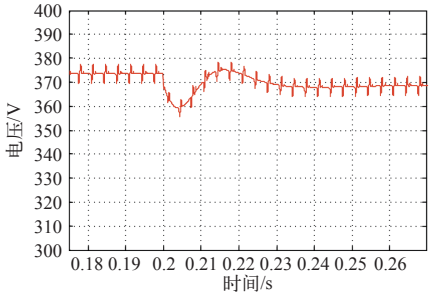



图6 并联电感和电容后380 V电压波形

经过并联电感、电容之后，380 V侧电压与图2的电压波形相比，有明显改观；分别与图4、图5比较可知，结合了两者的优点，有所改善但效果不是很明显，正如实地考察时得到的结果：由于电压失稳，因此装电容器补偿无功，稳定电压，使得谐波严重，谐波畸变率可以达到20%～30%，并联电感后，虽然能减少到10%左右，还是比较严重。经过研究分析，提出并联静止无功发生器（SVG）来稳压，使之满足实际生产的要求。

### 3.4 并联静止无功发生器（SVG）

SVG电路分为电压型和电流型，相比之下，



(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

电压型SVG的运行效率要高于电流型SVG，因此实际运行的SVG更多的是电压型。本文研究的是电压型SVG，其电路如图7所示。

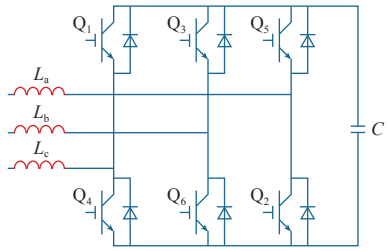



图7　电压型SVG基本电路

电压型SVG直流侧采用的是电容储能元件，交流侧需并联电容器后才能接入电网，3个桥臂上下共有6个IGBT进行换流，其等效电路如图8所示。

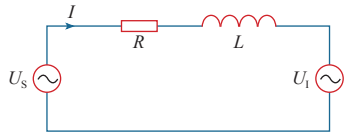



图8　电压型SVG等效电路

图8中，电网侧电压为$U_S$；SVG输出侧电压为$U_I$；阻感负载$R$、$L$电压为$U_L$，电流为$I$。由图8可得以下关系式，即

$$U_S = U_I + U_L \quad (1)$$

$$U_L = (R + X)I \quad (2)$$

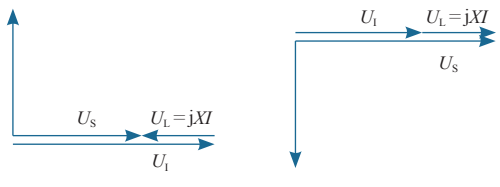
由式（1）、式（2）联立可得

$$U_S = U_I + (R + X)I \quad (3)$$

电网电压$U_S$不变，SVG输出电压$U_I$的幅值和相位直接决定SVG吸收电流$I$的幅值和相位，一般情况下分两种情况进行分析。

（1）不考虑损耗，$R=0$

$U_S$和$U_I$相位相同，可以达到控制电流$I$的目的。如图9所示。




（a）电流超前　　（b）电流滞后

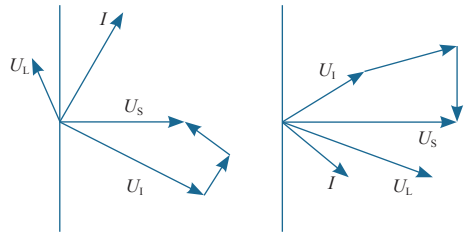
图9　不考虑损耗时的相量图

当$U_I$大于$U_S$时，电流超前电压90°，SVG吸收容性的无功功率。

当$U_I$小于$U_S$时，电流滞后电压90°，SVG吸收感性的无功功率。

（2）考虑损耗时，$R \neq 0$

$R \neq 0$时，电路消耗部分电能用来补充电路损耗，导致$U_S$和$I$相位差$\delta$小于90°。改变$\delta$和$U_I$的幅值，电流会随之改变，从而改变SVG的吸收无功大小。如图10所示。




（a）电流超前　　（b）电流滞后

图10　考虑损耗时的相量图

为了分析问题简便，将SVG在abc坐标系下的数学模型转化为$dq$坐标系下的数学模型，其采用闭环控制，流程如图11所示。

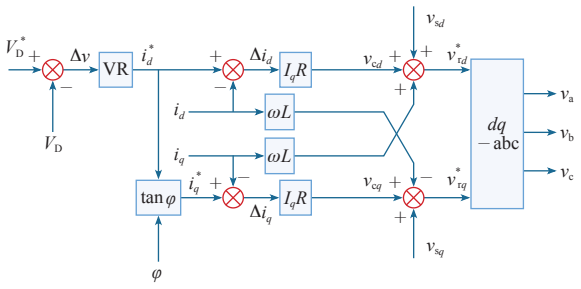



图11　SVG闭环控制流程图

针对国复厂电压失稳问题建立的SVG结构[7-8]如图12所示。图12中，SVG采用电压型桥式电路，是目前常用的方式。负载部分是指补偿的电路负载，包括线性负载和非线性负载；SVG主电路包括电力电子器件和滤波电感、电容；控制电路通过提取电压电流的瞬时值，经过坐标变换，提取出正序分量，经过调制，加到电力电子器件的控制端，实现实时控制的目的。

将SVG接入国复厂的配电网中，由于关注的是380 V侧电压的稳定性，因而将SVG并联在拉丝电动机机端，在拉丝电动机机端接入SVG之后，



(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

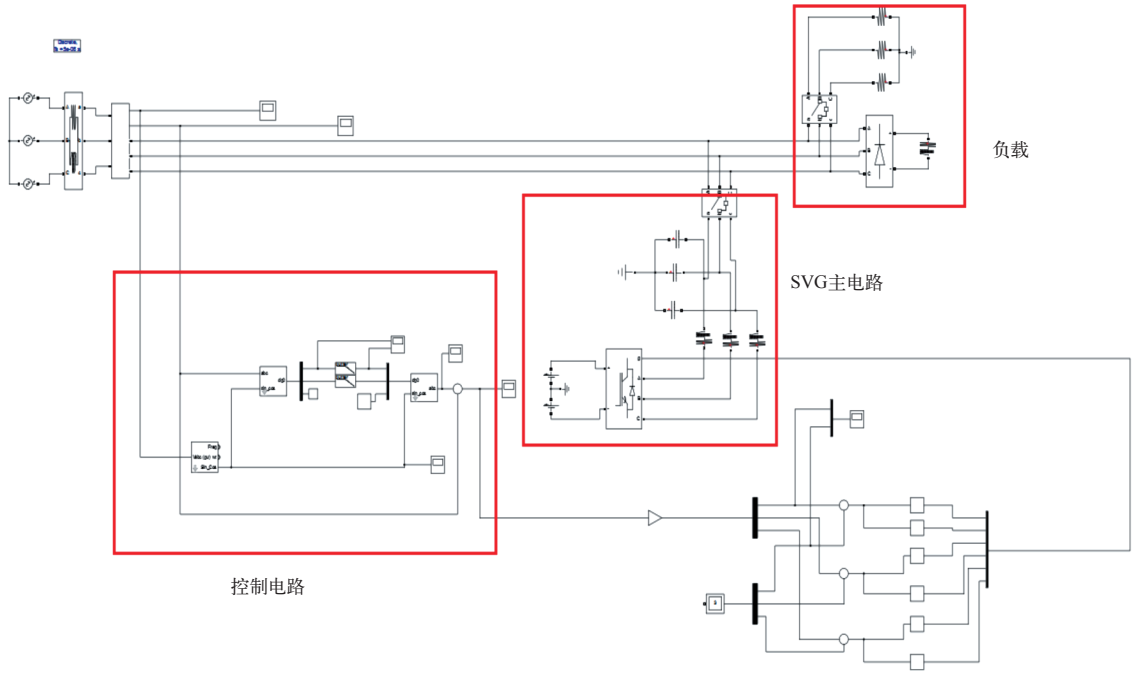



图12 SVG的电路基本结构

机端电压波形线电压有效值如图13所示。

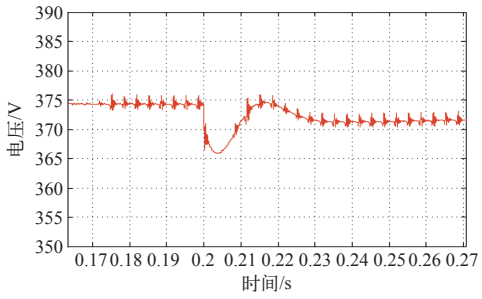



图13 接入SVG时380 V侧电压波形

分析图13可得，在发电机端接入SVG，不但使电压跌落的更少，而且使电路的谐波得到抑制，波形得到改善，动态性能表现在电压出现跌落时可以在短时间内稳定住电压，使其不至于跌落得太严重；仿真观察各相电压波形，在波峰处可以看出接入SVG之后波形畸变减弱，与之前分析的SVG的特性一致。

可以得出以下结论，SVG在稳压方面效果比较好，可以实时动态地稳定电压，在很大程度上可以改善电压电流波形，减小波形畸变，改善电能质量；然而SVG在电路运行过程中突然投入，会给电路带来比较大的冲击，这方面会带来很不利影响。因此，尽量避免SVG在电路运行的过程中突然投入，由于电网负荷是不稳定不可控的，可以根据负荷的容量控制SVG投入的大小，SVG只消耗少量的有功，但可以给电网电压带来很大的改善和稳定，因此可以让SVG在电路运行初始就投入，之后在有负荷扰动等因素造成的电压失稳中，SVG可以有效地实现动态调节。根据以上的理论分析和仿真分析，给国复厂选择比较好的稳压方案是投入SVG。

根据仿真结果，与方案1、方案2比较之后，可以看出在稳压和改善电压波形以及电路的动态稳定方面，SVG都具有明显的优越性。因此，建议国复厂根据异步电动机以及厂用电负荷的大小，选取合适的SVG，并联在380 V电压网侧，有利于改善电能质量，提高产品质量，降低次品量，提高产品的合格率，最终减少经济损失，为企业带来效益。

## 4 方案比较

### 4.1 标准定义

根据IEC 1000－2－2/4标准定义，电能质量是指供电装置正常工作情况下不中断和干扰用户使用电力的物理特性。由于电压、电流或频率偏差



(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

引起的，用户设备工作异常或损坏的任何电力问题，都属于电能质量问题[9]。

电压跌落：电压或电流有效值降至额定值的10%～90%，持续时间为0.5个周期至1 min。系统中常见典型的电压跌落持续时间为一个周波至1 s，通常持续几十毫秒至几百毫秒。持续时间超过1 min的电压降低称为“欠电压”。

总谐波畸变率（THD）：周期性交流量中的谐波含量的方均根值与其基波分量的方均根值之比（用百分数表示）。电压总谐波畸变率用$THD_u$表示；电流总谐波畸变率用$THD_i$表示。

根据GB/T 14549—1993 标准规定，公共电网谐波电压（相电压）限值如表1所示。

表1 公共电网谐波电压（相电压）

| 电网标称电压/kV | 电压总谐波畸变率 $THD_u$(%) | 各次谐波电压含有率(%) 奇次 | 偶次 |
|---|---|---|---|
| 0.38 | 5.0 | 4.0 | 2.0 |
| 6 | 4.0 | 3.2 | 1.6 |
| 10 | 4.0 | 3.2 | 1.6 |
| 35 | 3.0 | 2.4 | 1.2 |
| 66 | 3.0 | 2.4 | 1.2 |
| 110 | 2.0 | 1.6 | 0.8 |

### 4.2 方案比较

针对以上不同方案，其表征电能质量的一些参数如表2所示。根据表2的数据显示，可以总结出：并联电容会达到稳定电压的效果，不过加入之后使得总谐波畸变量变大；并联电感可以在一定程度上减少谐波畸变率，因此并联电容加电感可以在一定程度上稳压并减少谐波畸变率。在上述几种方法的基础上，并联无功发生器，稳压效果以及谐波畸变率都得到了改善。

表2 不同方案改善电能质量的情况

| 方案 | 电压跌落/V | 恢复稳态电压时间/s | 稳压值/V | 总谐波畸变率 THD(%) |
|---|---|---|---|---|
| 不采取措施 | 22 | 0.04 | 360 | 8 |
| 并联电容 | 12 | 0.03 | 369 | 22.47 |
| 并联电感 | 13 | 0.03 | 369 | 17.6 |
| 并联电感和电容 | 14 | 0.04 | 370 | 10.8 |
| 并联SVG | 8 | 0.03 | 372 | 6.47 |

## 5 结束语

针对目前大功率工业用电用户电能质量的改善进行研究，对电压幅值敏感的设备其端电压的稳压策略进行分析，最后提出在设备端并联无功补偿发生器（SVG）来实现输入电压的稳定以及电能质量的改善，从而提高产品的合格率，为企业带来更大的效益，对用户和电力公司都有重要的意义。

### 参考文献


[1] 罗杰，钟庆，武志刚，等．高新技术企业用户电压质量问题分析 [J]．电网技术，2007，31 (增刊1)：61-63．

[2] 钟庆，易杨，武志刚，等．电力用户电压暂降问题分析与仿真 [J]．电力系统及其自动化学报，2008 (6)：102-106，115．

[3] 魏荣进．电压暂降检测与扰动源辨识方法的分析与研究 [D]．长沙：湖南大学，2012．

[4] 甄晓晨，陶顺，肖湘宁，等．电压暂降的工厂级经济损失评估模型研究 [J]．电力系统保护与控制，2013，41 (12)：104-111．

[5] 王丽华．10 kV配电系统无功补偿技术的研究 [D]．天津：天津大学，2010．

[6] Liu Zhao，Shi Yan-jun，Duan Shan-xu，et al．The research of DC capacitance voltages balancing strategy based on cascade STATCOM using individual phase instantaneous current tracking [C]．Power Electronics and Motion Control Conference，2009：1136-1140．

[7] 李媛．新型静止无功发生器SVG控制策略仿真研究 [D]．北京：北京交通大学，2008．

[8] 刘俊杰．静止无功发生器 (SVG) 的研究与设计 [D]．天津：天津理工大学，2012．

[9] 钟庆，林凌雪，易杨，等．电压暂降评估指标 (Ⅰ) ——电网薄弱环节指标 [J]．电力系统及其自动化学报，2012 (1)：110-114．


（收稿日期：2015－06－22）EA



(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net