

本科生课程报告

课程名称：电工技术

课程编码：EE31029

学 院	机电工程学院
姓 名	李明谦
学 号	8200880133
报告日期	2022 年 5 月 4 日

说 明

一、围绕功率因数的学习报告

学习报告



学习报告基本要求：阐述在工程实践中功率因数的重要性。在一个给定的感性负载的工作条件下（ P 、 U 、 $\cos\phi$ 、 $f=50\text{Hz}$ ），需将功率因数提高到一定值。试从补偿无功功率的研究路线出发，确定出所需补偿电容的数值。

二、对报告的要求

1. 报告字数应不低于 4000 字
2. 含有无功补偿电容的计算过程及结果

三、字体、字号及其他规定

正文字体：宋体小四。

各级标题字体：宋体四号，加粗。

行距：1.3 倍行距。

一、功率因数在工程实践中的作用

功率因数是指交流电路有功功率对视在功率的比值。用户电器设备在一定电压和功率下，该值越高效益越好，发电设备越能充分利用。功率因数在工程实践中具有重要的作用。具体有以下几方面：

1、基于电力弹簧的电压及功率因数的光伏并网稳定方法^[1]

传统的 ES 功率控制都只是单一地控制有功或无功功率，角度只有两种变化。在已有研究基础上，本文提出了一种基于 ES 的负荷电压及功率因数控制方法，可同时控制有功和无功功率，有 4 种工作模式：

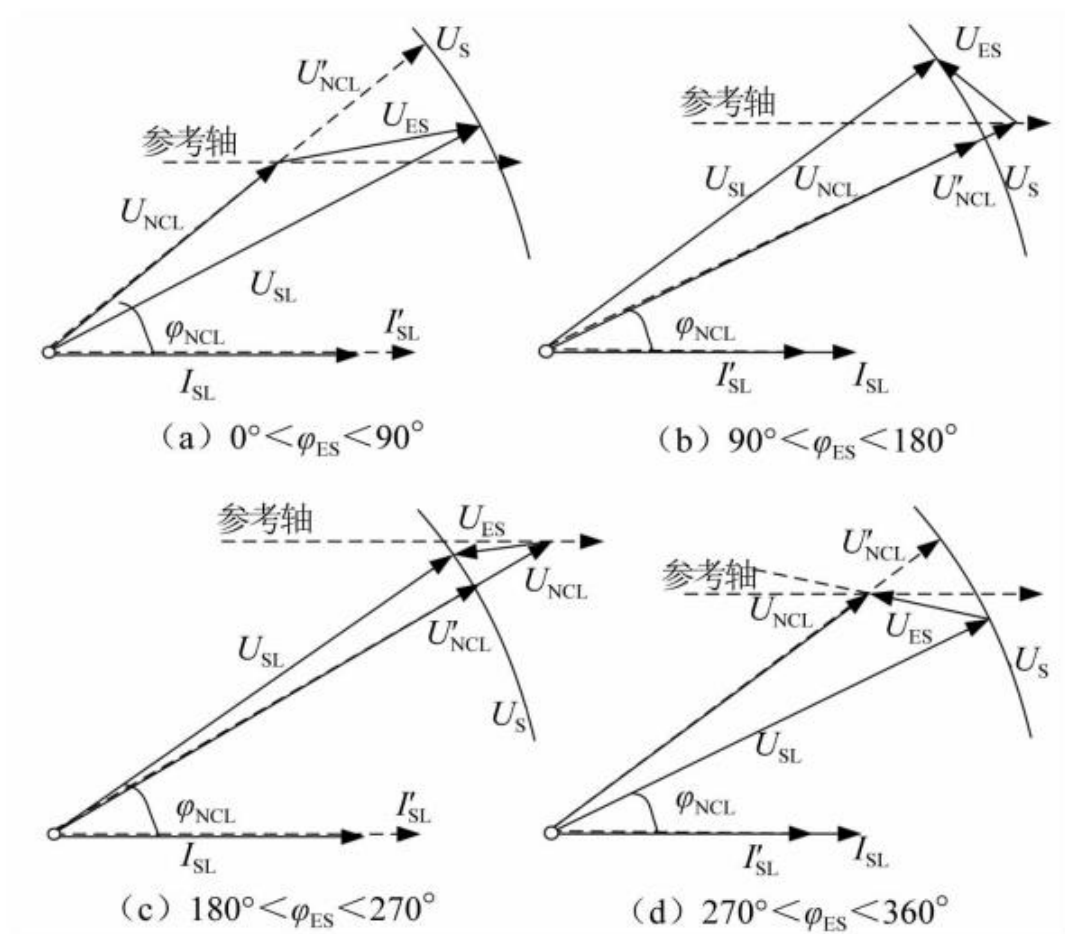


图 1 ES 的有功-无功综合控制相量图

将 U_{ES} 进行分解，数值关系可表示为： $U_{ESP}^2 + U_{ESQ}^2 = U_{ES}^2$ 。式中： U_{ESP} 、 U_{ESQ} 分别是 U_{ES} 有功和无功控制分量。根据传统的电压和功率控制方式以及图 1，建立如图 2 的电压控制回路。

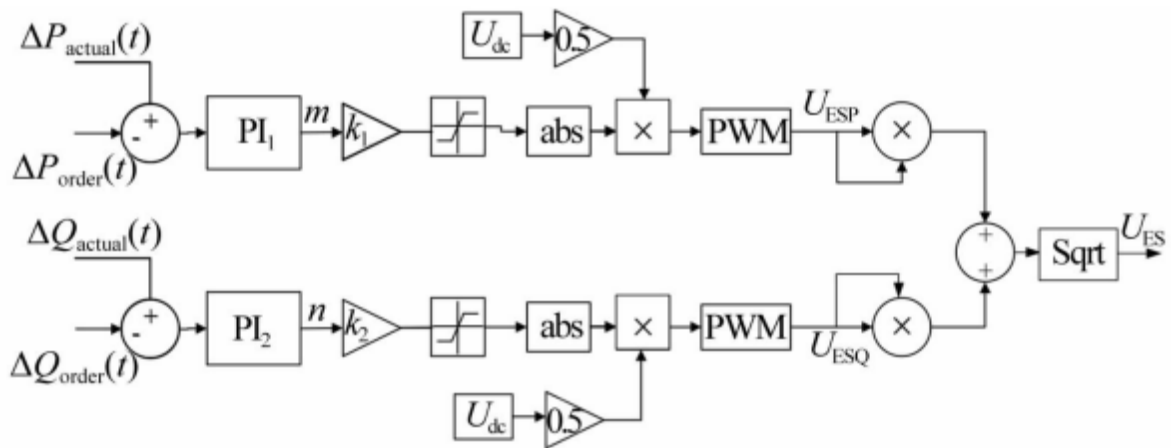


图 2 ES 功率- U_{ES} 控制回路

图 2 中： $\Delta Q_{order}(t)$ 为 ES 的无功功率指令； $\Delta Q_{actual}(t)$ 为负荷 实际无功功率； $\Delta P_{order}(t)$ 为 ES 的有功功率指令； $\Delta P_{actual}(t)$ 为负荷实际有功功率； k_1 、 k_2 为 PI 控制器的增益； abs 为取绝对值函数。为实现对有功和无功功率的综合控制，还需对相位差 ψ_{ES} 进行控制，将 ψ_{ES} 分解成 ψ_{ES1} 和 ψ_{ES2} 两个分量的数值叠加。分析可得到 ES 的相位控制回路示意图如图 3 所示。

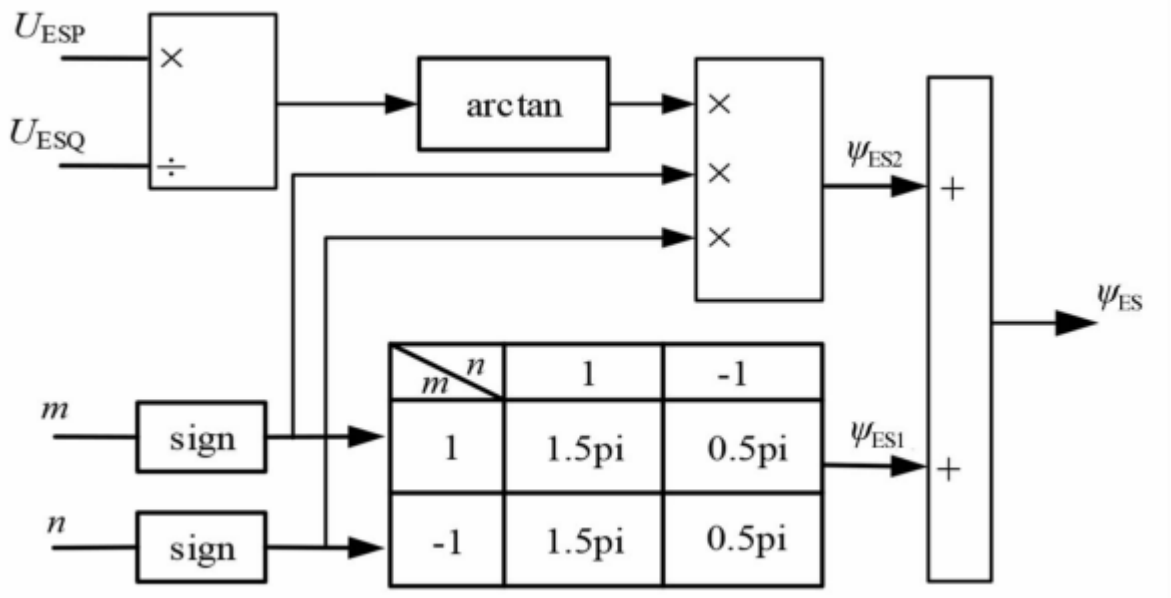


图 3 ES 功率- ψ_{ES} 控制回路示意图

将 U_{ES} 控制回路和 ψ_{ES} 控制回路联立综合分析，构成如图 4 所示的 ES 有功-无功综合控制回路示意图。

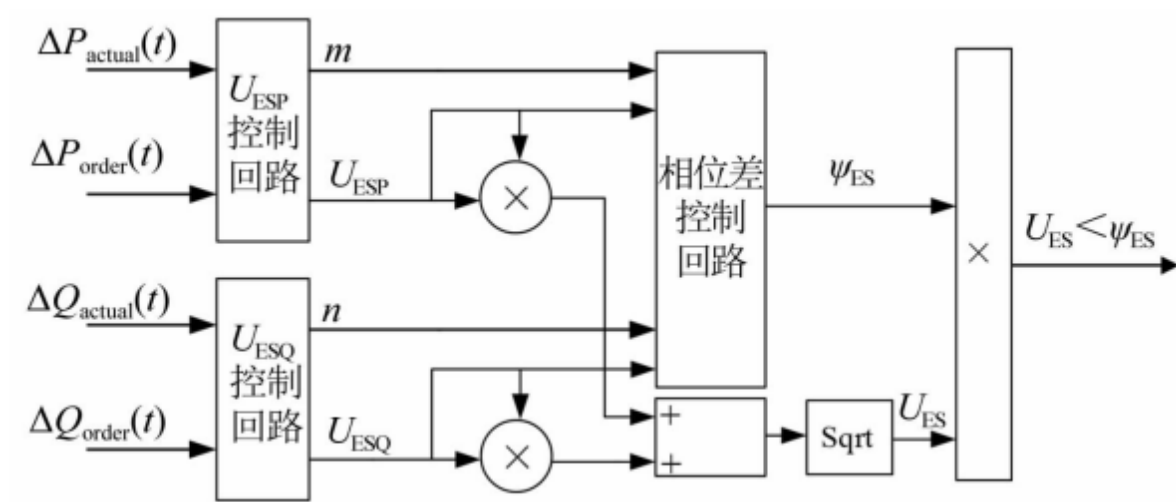


图 4 ES 有功-无功综合控制回路示意图

通过上述控制回路可以动态地控制 U_{ES} ，从而能够同时控制有功和无功功率，进一步地实现 ES 对负荷电压和功率因数的综合控制。

2、基于高功率因数混合型变换器的爆闪式信号灯设计^[2]

2.1 混合型变换器的工作原理

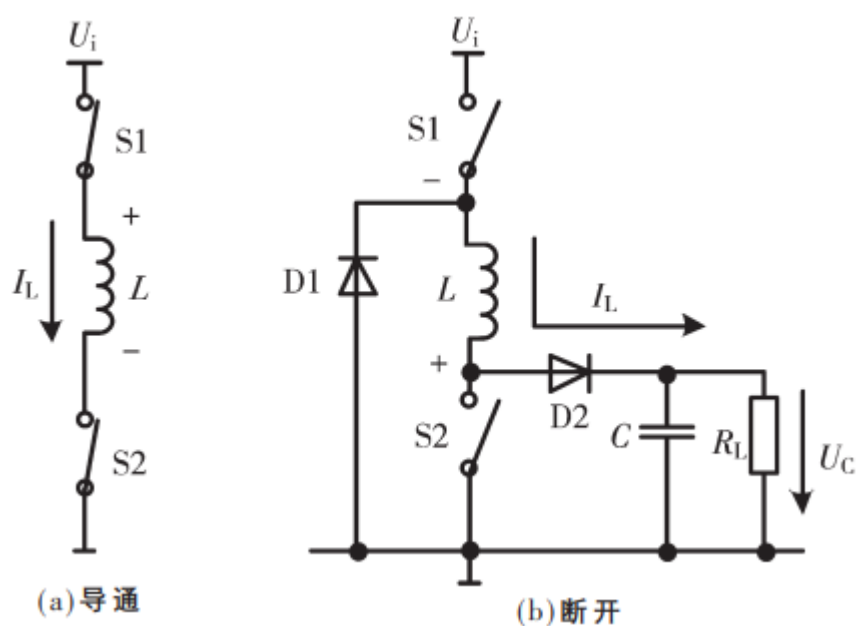


图 5 导通和断开时工作分解图

当 S1、S2 截止时 L 的极性翻转，D1、D2 导通电感的电压 $U_L \approx U_C$ ，电感 L 的电流提供给 C 和 负载 R_L 。因此 S1 承受的反向电压为 U_i ，S2 承受的反向电压为 U_C ，因此这种电路特别适合用在输出电压高的场合。由于输出电压 $U_C \approx U_L$ ，而 U_L 的大小取决于电感储存的能量，和负载 R_L 有关，因此可进行升压、降压变换。从图 4 中可以看出 S1、L、D1 组成 Buck 变换器，S2、L、D2 组成 BOOST 变换器。

2.2 高功率因数混合型变换器工作原理

为了获得高功率因数变换，采用占空比控制电感电流开关的方法，而不是检测电感电流。图 7 为工作原理示意图。 U_i 为全波整流后正弦波的半波电压，每个高频周期 T 内按占空比 D 进行开关后得到不同的峰值电流 I_p 。可见电感电流的平均值很好地跟踪输入电压波形，因此功率因数很高。

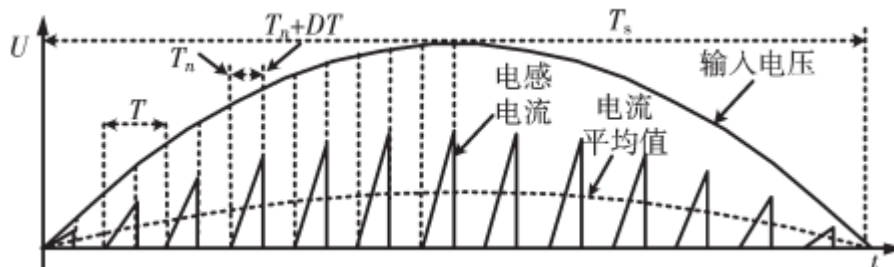


图 6 固定占空比时电感电流示意图

2.3 高功率因数混合型变换器电路设计

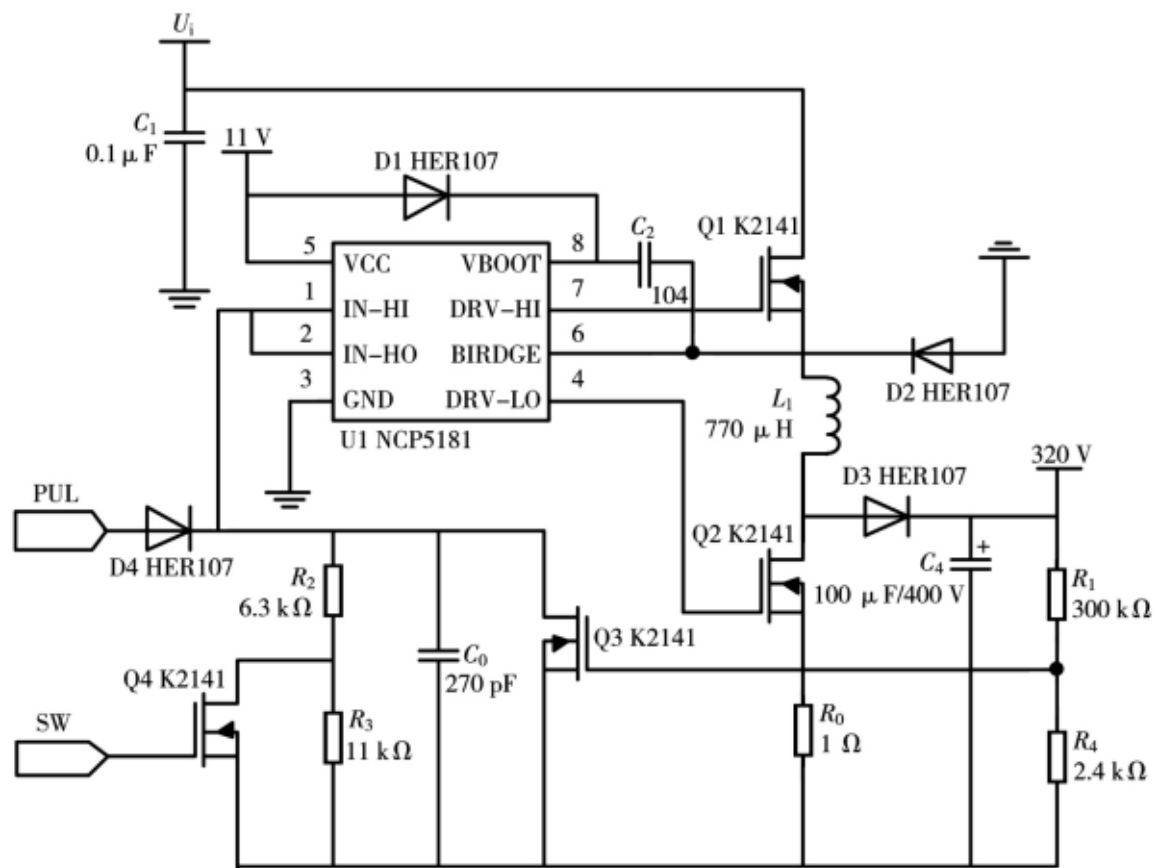


图 7 高功率因数混合型变换器电路

高功率因数混合型变换器电路如图 7 所示。单片机产生 50 kHz、 $D=5\%$ 、幅度为 5V 的窄脉冲提供给 PUL 端，SW 端用于切换 110 V/220 V 工作状态，当 U_{AC} 为 170~250 V 时 SW 为高电平 Q4 导通 R_3 被短路， C_0 的电压通过 R_2 放电产生占空比。当 U_{AC} 为 80~170V 时 SW 为低电平 Q4 截止， C_0 的电压通过 R_2 和 R_3 放电产生占空比。Q3 的作用是，当电容 C_4 的电

压超过设定值 320 V 时 Q3 开始导通把 C₀ 的电压迅速放电，只提供最小的占空比，维持输出电压。

3、考虑机组功率引述的分布式风机选址定容研究^[3]

装有风机组的节点 i 的总有功和无功注入关系式如下：

$$P_i = P_{DG_i} - P_{Di}$$

$$Q_i = Q_{DG_i} - Q_{Di}$$

由以上公式可知，有功和无功损耗是 P_{DG} 和 a 的函数。这两个变量对配网网损有很大影响。下图给出了有功损耗与 DG 机组容量、功率因数的变化关系。

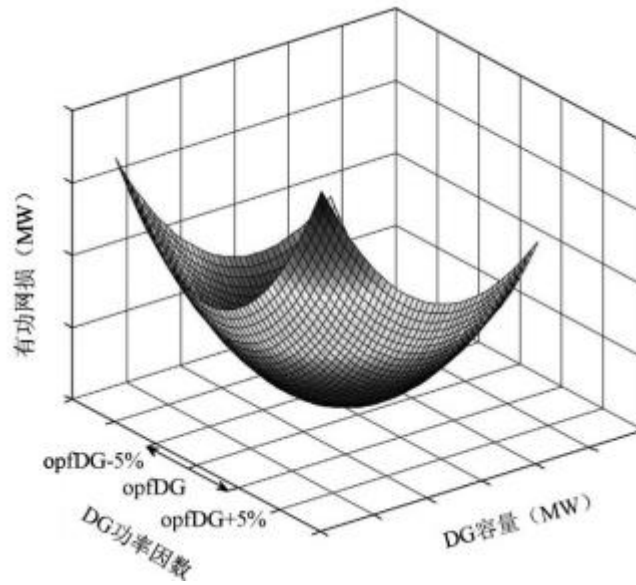


图 8 位置和功率因数对系统有功损耗的影响

从图 8 中可以得知，对于某一确定的功率因数，有功网损与风机的容量首先成反比关系，网损最小点即是风机最优容量。随着风机容量的增加，有功网损也上升，两者呈现正比关系。类似地，对于给定风机容量，网损最小时可得到最优功率因数。相似的结论对于无功网损同样适用。因此，风机配置在合适的容量、运行于最优功率因数对于减少系统网损是至关重要的。根据网损在有功注入各节点 i 的变化情况用来确定风机的位置。由于某节点安装风机后会增加该节点的有功注入，使得该节点对有功网损的灵敏度为负的最大节点为最佳的风机安装位置，从而能够在该节点减少网损 的量最大。以网损最小为目标的节点 i 的风机容量为：

$$P_{DG_i} = \frac{\alpha_{ii}(P_{Di} + \alpha_i Q_{Di}) - A_i - \alpha_i B_i}{\alpha_{ii}(\alpha_i^2 + 1)}$$

$$Q_{DG_i} = \alpha_i P_{DG_i}$$

其中，

$$A_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N (\alpha_{ij} P_j - \beta_{ij} Q_j)$$

$$B_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N (\alpha_{ij} P_j - \beta_{ij} Q_j)$$

该式适用于当 $\text{pf}_{\text{DG}i}$ 或者 a_i 已知时，确定不同风机的最优容量。风机等 DG 机组的功率因数取决于运行条件和 DG 类型。通过设置 $\text{pf}_{\text{DG}i}$ 的参数值可以确定各节点风机的最优容量。

对电力系统的常规负荷，功率因数一般为滞后的感性特性，功率因数在 0.7-0.95 之间，因此，风机的最优功率因数应当滞后。本文假设负荷的功率因数均为滞后的。上式确定了机组的最优有功和无功容量，分别确定了机组的最优有功和最优无功容量，节点 i 的机组同时注入有功和无功便可得到机组的最优容量，即：

$$S_{\text{DG}i} = \sqrt{P_{\text{DG}i}^2 + PQ_{\text{DG}i}^2}$$

本式也说明，风机能够在总系统损耗最小的节点 i 同时提供有功和无功。因此，对于安装于网络内的风机，节点 i 的机组的最优功率因数为：

$$\text{opf}_{\text{DG}i} = \frac{P_{\text{DG}i}}{\sqrt{P_{\text{DG}i}^2 + PQ_{\text{DG}i}^2}}$$

4、煤矿井下供电系统无功补偿和功率因数调节方法^[4]

在无功补偿过程中，涉及问题多种多样。因为无功补偿是一个耦合性较强的控制问题，并且在补偿过程中变量较多，如电力系统的时变特性、系统运行变量等，导致控制模型的输出结果不精确，系统电压以及功率因数无法达到最优配置。对于供电系统来说，其需要有功功率保持一定，为此要想达到提高系统功率的目的，就需要对系统无功需求进行调整，从而为功率因数调节提供支持。系统功率因数提高 $\cos \phi' = \frac{PC}{SC'}$ 式中 PC ——有功功率； SC' ——系统的视在功率。同时计算需要补偿的容量 $QN = PC (\tan \phi - \tan \phi')$ 在实际补偿时需要根据系统的实际负荷情况进行补偿，如果系统实际负荷减小，则补偿的容量也减小，避免出现过度补偿的情况。在此需要对补偿的容量进行控制，为了克服传统方法的缺陷，将模糊控制算法引入到供电系统无功补偿中。模糊控制方法就是利用模糊逻辑规则对需要表达的知识进行推理，它解决了复杂的非线性时变问题，模糊控制基本结构如图 9 所示。

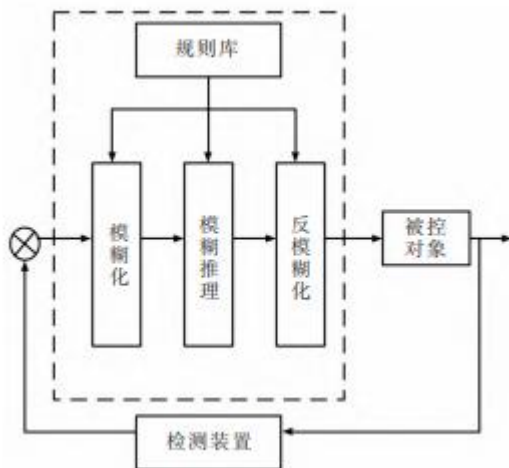


图 9 模糊控制基本结构

在上述方法的基础上调节功率因数，有效降低变压器的铜损。假定某个变压器的额定容量为 S ，电压值为 U_N ，则变压器的额定电流 $I_N = \frac{P}{\sqrt{3}U_N}$ ，式中 P 为变压器在工作过程中输送的用功功率。此时的线路负载电流： $I_1 = \frac{P}{\sqrt{3}U_N \cos \varphi_1}$ ，式中 $\cos \varphi_1$ 为功率因数。变压器的铜损：

$$\Delta P_{cu} = \Delta P_{cuN} \left(\frac{I_1}{I_N} \right)^2 = \Delta P_k \left(\frac{I_1}{I_N} \right)^2, \text{ 式中 } \Delta P_{cuN} \text{ 为变压器而定的铜损值, } \Delta P_k \text{ 为线路损耗。}$$

在补偿后，功率因数变为 $\cos \varphi_2$ ，则当时的线路负载电流 $I_2 = \frac{P}{\sqrt{3}U_N \cos \varphi_2}$ ，上述过程能够对功率因数进行调节，从而降低变压器的铜损，至此完成了供电系统无功补偿和功率因数的调节。

二、无功补偿

1、无功补偿的原理

电网输出的有功功率，是通过用电设备把电能转变为机械能，热能，化学能或声能等，是用户所需要的部分。而无功功率则不通过用电设备转变能量，对我们来说不能发挥作用。无功补偿的基本原理是：把具有容性功率负荷的装置与感性功率负荷并联接在同一电路，能量在两种负荷之间相互交换。这样，感性负荷所需要的无功功率可由容性负荷输出的无功功率来补偿。当前，国内外广泛采用并联电容器作为无功补偿装置。这种方法安装方便、建设周期短、造价低、运行维护简便、自身损耗小。

2、无功补偿的原则

提高用电单位的自然功率因数，无功补偿分为集中补偿，分散补偿和随机补偿，应该遵循：全面规划，合理布局，分级补偿，就地平衡；集中补偿与分散补偿相结合，以分散补偿为主；高压补偿与低压补偿相结合，以低压补偿为主；调压与降损相结合，以降损为主的原则。

3、无功补偿的意义

补偿无功功率，可以增加电网中有功功率的比例常数。减少发、供电设备的设计容量，减少投资，提高功率因数后，线损率也下降了。减少设计容量，减少投资，增加电网中有功功率的输送比例，以及降低线损都直接决定和影响供电企业的经济效益。

无功补偿改善电能质量

电网中无功补偿设备的合理配置，与电网的供电电压质量关系十分密切。合理安装补偿设备可以改善电压质量。由于越靠近线路末端，线路的电抗越大，因此越靠近线路末端装设无功补偿装置效果越好。

无功补偿降低电能损耗

安装无功补偿主要是为了降损节能，如输送的有功 P 为定值，加装无功补偿设备后功率因数由 $\cos \phi$ 提高到 $\cos \phi_1$ ，因为 $P=UI\cos \phi$ ，负荷电流 I 与 $\cos \phi$ 成反比，又由于 $P=I^2R$ ，线路的有功损失与电流 I 的平方成正比。当 $\cos \phi$ 升高，负荷电流 I 降低，即电流 I 降低，线路有功损耗就成倍降低。

无功补偿挖掘发供电设备潜力

(1) 在设备容量不变的条件下，由于提高了功率因数可以少送无功功率，因此可以多送有功功率。可多送的有功功率 ΔP 计算如下：
$$\Delta P=P_1-P=S(\cos \phi_1-\cos \phi)$$

(2) 如需要的有功不变，则由于需要的无功减少，因此所需要的配变容量也相应地减少 ΔS 计算如下：
$$\Delta S=S-S_1=P(1/\cos \phi-1/\cos \phi_1)$$
 可以减少供电设备容量占原容量的百分比为 $\Delta S/S$ 计算如下：
$$\Delta S/S=(\cos \phi_1-\cos \phi)/\cos \phi_1=(1-\cos \phi/\cos \phi_1)$$

(3) 安装无功补偿设备，可使发电机多发有功功率。系统采取无功补偿后，使无功负荷降低，发电机就可少发无功，多发有功，充分达到铭牌出力。

无功补偿减少用户电费支出

(1) 可以避免因功率因数低于规定值而受罚。

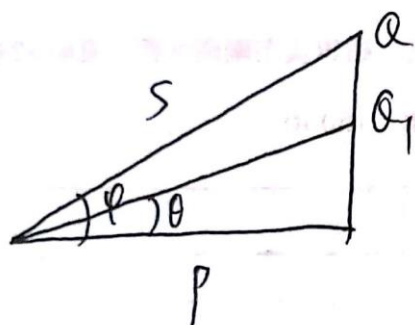
(2) 可以减少用户内部因传输和分配无功功率造成的有功功率损耗，因而相应可以减少电费的支出。综上所述，采用无功补偿可以提高功率因数，是一项投资少，收效快的节能措施。并联补偿电容器原理简单、使用方便、运行经济、投资省、可以分组投切保证电压合格率和合理的功率因数。我国各地区配网和农网很多地方平均功率因数偏低，有降低线损的潜力。通过计算，采用补偿电容器进行合理的补偿一定能取得显著的经济效益。

4、无功补偿的方式

- ①在变电所母线集中安装并联电容器组；
- ②在高低压配电线路中分散安装并联电容器组；
- ③在配电变压器低压侧和用户车间配电屏安装并联补偿电容器；
- ④在单台电动机处安装并联电容器等。

设置无功补偿设备，不仅可使功率消耗减小，功率因数提高，还可以充分挖掘设备输送功率的潜力。

三、补偿电容的数值



$$Q = P \tan \varphi$$

$$Q_1 = P \tan \theta$$

$$P \tan \varphi - P \tan \theta = I^2 X_C$$

$$I = \frac{P}{U}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$\therefore C = \frac{U^2 (\tan \varphi - \tan \theta)}{P}$$

经计算，补偿电容 C 可以将功率因数从 $\cos \varphi$ 增加到 $\cos \theta$ ，可根据 θ 的值选择不同的电容。

参考文献

[1] 刘勋宇, 庞宇琦, 张新源, 徐啸天, 周杨, 马刚. 基于电力弹簧的电压及功率因数的光伏并网稳定方法[J]. 电气自动化, 2021, 43(05): 55-58+61.

[2] 王志凯, 张源, 金永镐. 基于高功率因数混合型变换器的爆闪式信号灯设计[J]. 电子技术应用, 2021, 47(10): 118-123. DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.211436.

[3] 陈巍, 杨兵, 朱益民. 考虑机组功率因数的分布式风机选址定容研究[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(02): 133-135+161.

[4] 倪少军, 李双良. 煤矿井下供电系统无功补偿和功率因数调节方法[J]. 煤矿机械, 2022, 43(03): 139-142. DOI:10.13436/j.mkjx.202203046.