

De uundgåelige impedans-tilpasninger af linjesignaler mellem signalkilder og forstærkere o.l.

Rør-katodefølgeren og dens unikke egenskaber ved optimal sektionsdeling i lyd-kæden.

For ca. 53 år siden kunne man læse et par særdeles velskrevne og lærerige artikler i bladet ”Populær Radio og Fjernsyn”.

”Katodefølgerer i teori og praksis” af Frej Jørgensen. November/december 1963.

Katodefølgerer (fælles-anode forstærkere) besidder nogle helt unikke egenskaber, der med stor fordel kan anvendes i audioelektronik.

Stadig tidssvarende!

I hi-fi-tidens tidlige ungdom fandt denne forstærker eller måske rettere dette ”tilpasningsled” stor anvendelse.

Det var i perioden, hvor man begyndte på at koble flere forskellige apparater sammen i lydanlægget.

Mange hi-fi-entusiaster anskaffede sig separate grammofoner, RIAA - phonoforstærkere, båndoptagere, FM tunere m.v.

I en hel del tilfælde passede apparaternes impedanser ikke optimalt sammen, og flere alt for lange signalveje påvirkede frekvenslineariteten, inducerede brum eller forvrængning.

Kuren mod dette problem kunne være anvendelse af katodefølgeren som buffer for de forskellige lydkilder, der skulle tilkobles udgangsforstærkeren, forforstærkeren eller mixeren.

Er man rør-entusiast og har et hi-fi-anlæg med rør, er katodefølgeren i dag lige så anvendelig som for 50 år siden og måske endnu mere aktuel, og i visse tilfælde endda en nødvendighed.

Og hvorfor så det?

Alle rørforstærkere er normalt relativt højimpedansede, hvis de afgiver signalet fra anoden på røret i det sidste trin i forstærkeren. (typisk for de meget anvendte, fælleskatode-koblede forstærkere)

F.eks. kan impedansen for et ECC83 i optimal konfiguration (fælles katode) være 70k Ohm, og tommelfingerreglen siger, at dette trin så bør ”kigge” ind i mindst ca. 700k Ohm for ikke at miste signalsving, frekvenslinearitet og hermed øget THD.

Rørdrevne udgangsforstærkere har ofte en indgangsimpedans på omkring 50-100k Ohm, så ikke engang her er forholdet optimalt.

Transistorforstærkere, f.eks. til subwoofer brug, eller til aktive højttalerbrug er gerne meget lavere, helt ned til 10-20 k Ohm og endnu lavere balancerede.

Så her kan det gå helt galt med mistilpasning!

Samme problematik findes med mistilpasning mellem forstærkerindgang og guitarpickupper, dynamiske såvel som piezo, og det samme gælder for forskellige typer af studie- / koncert-mikrofoner.

Der findes mange ”frustrerende” situationer baseret på dyre investeringer i top hi-fi grej, der grundet forskelligt fabrikat og konstruktionsidé ikke ”spiller” sammen!

For de teknisk interesserede

I de følgende afsnit beskrives en katodefølger, der trofast og stabilt har tjent mig de sidste 5-6 år.

Alle mine lydkilder er tilsluttet den.

- 1) DAC
- 2) FM
- 3) CD
- 4) Phono
- 5) I-phone ..m.v.

Den er lavet for at skifte mellem diverse lydkilder og derefter sektiondele i to separate stereosignaler.

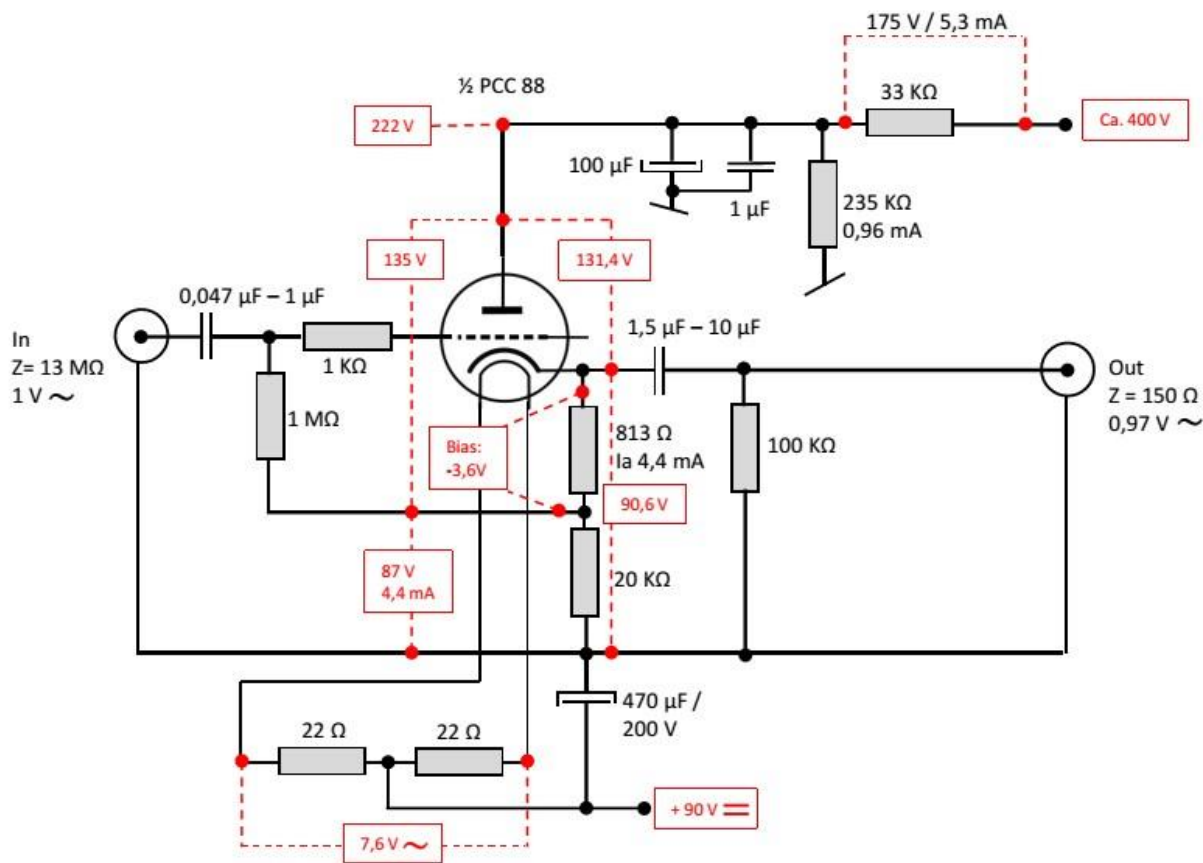
Et signal går til et par rørforstærkere, der driver højttalerne (øvre bas, mellemtone og diskant).

Det andet signal tilsluttes et par klasse-D-forstærkere i subwooferen med lange linjekabler hver på ca. 5 m.

De to udgange er totalt separate, og har hver en udgangsimpedans på ca. 150 Ohm.

Indgangsimpedansen på katodefølgerene er ca. 13M Ohm hver, og i parallel bliver det således til 6,5M Ohm.

Diagrammet viser én af de fire ens katodefølger. (ekstern printbar PDF-fil)



Strømforsyningen er en velfiltreret, brokoblet højspændingsensretter med filterdrossel, og hver rørsektion i katodefølgeren har egen filtermodstand på 33k Ohm og en 100 μF 500V e-lyt. shuntet med 1 μF kondensator.

Glødspænding er 7,6V= , og kredsen er løftet med + 90V for at imødegå den høje spændingsforskel mellem katoden og glødetrådene.(Vf/k)

Alle spændinger i diagrammet er målte og faktiske spændinger for den viste rørsektion.

De afvigelser, der ses i evt. beregnede spændinger/ strømme, skyldes målegrejets tolerancer, komponenttolerancer og løbende variationer på lysnettet.

(Har næsten ingen indflydelse på det overordnede resultat).

De viste og anvendte kurver (fig. 1 & 2) er fra Philips "Miniwatt Data Handbook 1968" PCC88 datablad (= ECC88 på nær glødespændingen).

Kurverne er baseret Philips data baseret på deres "ideal rør", og derfor ikke nødvendigvis helt ens med det af mig anvendte rør! (Dog kun små afvigelser).

NB! Hvis man ønsker de mest nøjagtige data på sin katodefølgeropstilling, skal de beregnes udefra de(t) valgte rør, spændinger og loadlines.

Man kan ikke anvende data direkte fra databladet til at sætte ind i formlerne!

Det vi ønsker at beregne og at vide:

- 1) Indgangs og udgangsimpedans
- 2) Forstærkning
- 3) Frekvensgang
- 4) Forvrængning

Til at plote ind på kurvepapiret hentes en del af de nødvendige mål fra diagrammet: (se ekstern printbar PDF-fil, fig.1)

Vb: 222V=indsættes på fig1. på X-axen

Ra: 20K Ohm

Ia kalkuleres: $222V=20k \text{ Ohm} \times I$ (Ohms lov) : $222/20000= 0,0111 \text{ A}=11,1 \text{ mA}$

De to punkter forbindes og angiver loadline som skærer X-axen ved 222V og Y-axen

Ved 11,1 mA

Va: 131V afsættes på X-axen og en linje vinkelret fra punktet skærer loadline i Vg1 kurven på værdien ca.-3,7V.

Fra dette punkt trækkes en linje vinkelret på Y-aksen, og værdien 4,5 mA kan aflæses. Denne værdi er I_a gældende for 131 V V_a og V_{g1} på -3,7V.

Der vælges spændingssving (pp) på V_g på ± 1 Volt (2V pp) afsat ud fra -3.7V punktet, svarende til -2.7V og -4,7V.

Fra hvert af kurvepunkterne -2,7 og -4,7, vinkelret ned på X-aksen trækkes en linje, der afsætter værdierne 105V og 155V på hver side af V_a 131V.

Nu kan værdien V_o udregnes: $V_o = \Delta V_a / \Delta V_g$. $V_o = (155-105) / (-4,7-2,7) =$

$$V_o = 50/2 = 25$$

Følgende refererer til fig.2 (se ekstern printbar PDF-fil)

Rørets stejlehed S for de anvendte værdier målt/vist i diagrammet er følgende:

$$S = \Delta I_a / \Delta V_g \quad (V_a \text{ holdes konstant})$$

På fig. 2. er linjen, der viser V_a 131V, tegnet (rød)

Fra punktet, hvor 131V skærer kurven -2,7V afsættes, en linje vinkelret på y-aksen, der angiver I_a for -2,7V = 13,5 mA.

Punktet på den lodrette linje for V_a 131V, hvor kurven for V_g -4,7V skærer trækkes en linje vinkelret på Y-aksen og her aflæses 0,3 mA.

$$S = (13,5 \text{ mA} - 0,3\text{mA}) / (-4,7V_g - 2,7V_g)$$

$$S = 13,2 / 2 = 6,6 \text{ mA/V}$$

Herefter findes forholdet ”D” mellem V_a og V_g , når I_a (anodestrømmen) holdes konstant.

D kaldes ”gennemgrebet” og er en størrelse, der ikke anvendes ret meget mere.

D skal med hvis resultatet skal være helt korrekt!

$$D = \Delta V_g / \Delta V_a \quad (\text{med } I_a \text{ konstant}).$$

Den vandrette linje, der angiver I_a 4,5mA, skærer den lodrette linje, der angiver V_a 131V og kurvepunktet, der angiver V_g -3,7

Fra denne linje trækkes en lodret linje vinkelret på X-aksen, fra det punkt, der skærer $V_g=2,7$, og V_a 100V aflæses.

På samme måde afsættes et punkt på X-aksen, hvor kurven for $-4,7V$ skæres af linjen for I_a 4,5mA, og V_a 160V aflæses.

$$160V-100V = \Delta V_a \text{ 60 og } \Delta V_g \text{ 2}$$

$$\mathbf{D = 2 / 60 = 0,033} \quad \mu = 1/0,033=30,03 \text{ eller } \mu = \Delta V_a / \Delta V_g=60/2= 30$$

$$1/D = \mu = \Delta V_a / \Delta V_g$$

I den tyske rørlitteratur blev D ofte angivet i %, $D \% = 100/ \mu$

Katodefølgerens forstærkning er: $V_{kat} = V_o / 1+V_o$

$$\mathbf{V_{kat} = 25/26 = 0,96}$$
 (x forstærkning)

Indgangs modstanden, $R_{ind} = R_g ((1+V_o) / 1+(V_o \times R_k/(R_k+R_a)))$

$$\mathbf{R_{ind}} = 1M \times ((1+25) / 1+(25 \times 0,813)/(0,813+20)) =$$

$$1 \times (26 / 1 + (20,325 / 20,813)) = 1 \times 26 / 1,9765 = \mathbf{13,15 M}$$

Udgangsimpedansen, $R_{ud} = 1/ S \times (1 +D)$

$$\mathbf{R_{ud}} = 1/ 6,6 \times (1+0,033) = 1/6,82 = \mathbf{147 \text{ Ohm}}$$
 (Ohms lov når, V/mA)

NB! Hvis databladet for PCC/ECC88 og de tilnærmede formler ($R_{ind} = R_g(1+V_o)$ og $R_{ud} = 1/S$) var anvendt direkte, havde resultatet for ind -og udgangsimpedans været *26M ind og 80 Ohm ud!*

Generelle kommentarer til katodefølgeren og dens resultater:

Spændingerne til katodefølgeren ligger i den høje ende, men ingen fare! Katode til gløde-spændingsforskellen er udlignet til en V_f/k , tæt på 0 volt ved hjælp af en spændingsdeler fra HT til glødekredsløbet, der således løfter dette med ca. + 90 V.

Iflg. Databladet angives V_f/k max. 50V.

Frekvensgang:

10Hz	0dB
20Hz	0dB
100Hz	0dB
1000Hz	0dB
10kHz	0dB
20kHz	0dB
50kHz	0dB
100kHz	-0,1dB
1mHz	-0,3dB
2mHz	-2dB

Alle målinger er RMS: 2.55V (normal max. V_{out} fra eks. CD-afspiller.)

THD $V/2.55V$, 1000Hz 0,07% (=tonegeneratorens THD!)

Konklusion, THD må antages at være væsentlig lavere i katodefølgeroutput end det målte.

Målt forstærkning $v/1000$ Hz 0,99V ind og 0,96,3V ud = 0.973 X

(Den beregnede er dog "kun" 0,96 x)

(se eksterne billeder, firkant- og sinus kurver)

Kommentarer til firkant spændingsmålinger:

- 1) Firkantspænding angivet i $V_{pp} = 4,00V$
- 2) Lavfrekvens firkant-kurve kan blive bedre med større overføringskapaciteter. Eks. 10 μF afhængigt af behov, denne opstilling anvender 1,5 μF .

I den lave ende af frekvensspekteret forekomme meget sjældent signaler, der minder om "firkanter", så ønskes en bedre firkant gengivelse, må der anvendes større kondensatorer. (evt. også i indgangen)

Se *sinuskurven* for 10Hz. Den er næsten perfekt! (se ekstern billede)

Konstruktion og forbehold:

Ønsker man katodefølgeren til sektionsdeling af signalet til flere forstærkere med forskellige frekvensområder, kan det anbefales at anvende mindre værdier på indgangskondensatorerne i sektionen for højere frekvenser, f.eks.

1000pF/1500pF/2.2nF o.s.v, - evt. med omskifter.

Man kan hermed undgå at sende de dybeste frekvenser videre til en forstærker, der måske kun skal gengive fra 250Hz og op. Det vil give en meget bedre udnyttelse af f.eks. en mindre single-ended rørforstærker.

Man kan også, hvis man har en subwoofer, der virkelig kan præstere noget ned til 15Hz, øge kapaciteten på indgangskondensatoren til eks. 0,1 μ F og udgangs kondensatoren evt. til 10 μ F eller mere.

Store orgler kan flytte megen luft omkring disse frekvenser.

(Orglet i Atlantic City Convention Hall, USA, har en orgelpibe med en længde på 20 meter og en bredde på 1 meter. Den frembringer en "tone" helt nede på 8 Hz.)

Særdeles vigtige hensyn der bør tages for opnåelse af et godt resultat.

Indgangssektionen "gittersektionen" er meget højimpedanset og er derfor særdeles følsom overfor brum og mekaniske vibrationer / mikrofoni.

Ledningsføringen fra katodefølgerens indgang til rørets gitter bør være kortest mulig, og komponenterne skal fikseres med egnet silicone-dæmpningsmateriale (Syrefrit). Jeg har meget fine erfaringer med Dow Corning 3140 RTV Coating.

Tilledningerne fra indgangsstik bør være snoede. ("Skærm" kun i den ene ved stjernejordpunkt.) Kablet coates men 3140.

Rørsoklerne bør være af høj kvalitet, keramiske og med guld-doublé kontakter. Stjernejord / busbar- kombination anbefales for at undgå selvsving da konstruktionen kan arbejde i et meget stort frekvensområde. Et ECC 88 kan let håndtere frekvenser i RF VHF/UHF -området. (TV Tunere m.v.)

Box- og chassis bør være stabilt/ vibrationsdødt.

Kablet fra signalkilden skal være kortest mulig, og kablet skal være af god kvalitet, veldæmpet og med lav kapacitet.

Udgangen med de 150 Ohms impedans kaperer adskillige meter godt kabel uden signaltab (i audio området) med kabellængder 5-10 meter.

OBS! Bruger man omskifter med forskellige koblingskondensatorer i indgangen, bør katodefølgerudgangen dæmpes eller afbrydes under omskiftningen.

Undlader man afbrydelsen, opstår meget kraftige klikimpulser, når kondensatorerne omskiftes i gitterkredsen.

Fotos af firkant signal viser katodefølgerens fine evne til at gengive hele det anvendte audio-frekvensspekter.

Til målinger er anvendt en HP 331A Distortion Analyzer, en signalgenerator (2mHz, THD max. 0.08%) og Philips Oscilloscope PM 3208 20mHz.

