

TO 84-10

BEREKENING VAN DE PULSVORM

A. Boudesteijn

TO 84-10

# RIJKSINSTITUUT VOOR VISSERIJONDERZOEK

Haringkade 1 - Postbus 68 - IJmuiden - Tel. (02550) 31614

Afdeling: TECHNISCH ONDERZOEK

Rapport: TO 84-10  
BEREKENING VAN DE PULSVORM

Auteur: A. Boudesteijn

Project: 7-7153 - Elektrische stimulering

Projectleider: Ing. J.B. Agricola

Datum van verschijnen: december 1984

Inhoud:

1. Inleiding
2. De spanningspulsvorm
  - 2.1. De spanningspulsvorm algemeen
  - 2.2. Laden van de eerste puls
  - 2.3. Symmetrische leggen van de spanning
  - 2.4. Ontladen van de eerste puls
  - 2.5. Laden van de tweede puls
  - 2.6. Symmetrisch leggen van de spanning
  - 2.7. Ontladen van de tweede puls
3. De stroompulsvorm
4. Resultaten en konklusies van de berekeningen
  - 4.1. Resultaten en konklusies van de spanningsvorm
  - 4.2. Berekende tijden
  - 4.3. Resultaten en konklusies van de stroomvorm

Bijlagen

**DIT RAPPORT MAG NIET GECITEERD WORDEN ZONDER TOESTEMMING VAN DE  
DIRECTEUR VAN HET R.I.V.O.**

2793715

## 1. INLEIDING

In dit verslag worden de spanningen en stromen berekend die optreden in het elektrisch vervangschema van de op het RIVO ontworpen en gebouwde pulsgenerator voor de elektrische stimulering van platvis (projekt 7-7153).

Doel van deze berekeningen is het vergelijken van de gemeten waarden met de theoretisch mogelijk optredende waarden.

De berekeningen geven een goed inzicht in de optredende maximale spannings- en stroomveranderingen ( $dU/dt$  en  $dI/dt$ ); deze veranderingen zijn van essentieel belang voor de dimensionering van zowel componenten als circuits.

## 2. DE SPANNINGSPULSVORM

### 2.1. De spanningspulsvorm algemeen

De pulsform is in zijn algemeenheid onder te verdelen in verschillende delen. In figuur 1 is dit uitgevoerd.

Omdat de eerste puls er anders uitziet dan alle volgende pulsen, maar deze volgende pulsen wel bepaalt in vorm en amplitude, worden er twee pulsen uitgerekend, zowel de eerste als de tweede.

De delen worden dan (zie figuur 1):

AB - laden van de eerste puls (2.2)

BC - symmetrisch leggen van de spanning (2.3)

CD - ontladen van de eerste puls (2.4)

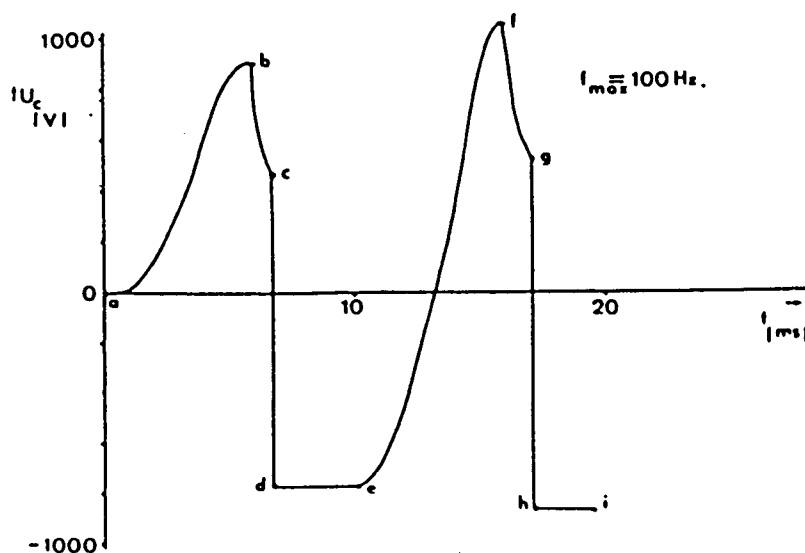
DE - wachten op de volgende puls

EF - laden van de tweede puls (2.5)

FG - symmetrisch leggen van de spanning (2.6)

GH - ontladen van de tweede puls (2.7)

HI - wachten op de volgende puls

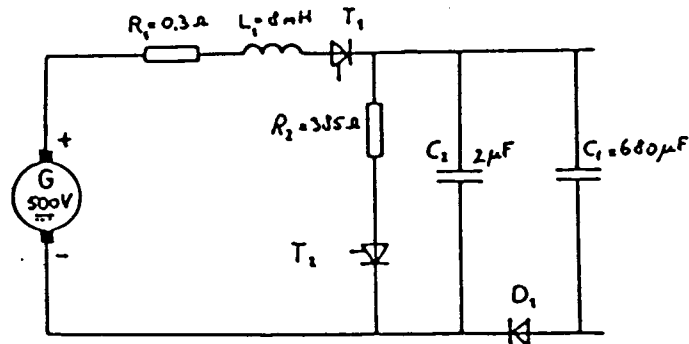


figuur 1 De pulsform.

## 2.2. Laden van de eerste puls

Het laden van condensator  $C_1$  gaat volgens een slingerkring die is getekend in figuur 2.

Door een 500 Volts stapfunctie wordt  $C_1$  geladen volgens de kring:  $R_1$ ,  $L_1$ ,  $T_1$ ,  $C_1$ ,  $D_1$ .



figuur 2 laadcircuit.

$$U_r = I \cdot R \qquad U_l = L \frac{di}{dt} \qquad i = C \frac{dU_c}{dt}$$

$$\text{en } U_g = U_r + U_l + U_c \qquad U_g = L \cdot C U_c'' + R \cdot C U_c' + U_c$$

Met Laplace-transformatie kan de laadvorm worden bepaald.

$$U_c(s) \cdot s^2 - s \cdot U_c(0) - U_c'(0) + U_c(s) \cdot \frac{R}{L} \cdot s - \frac{R}{L} U_c(0) + \frac{U_c(s)}{L \cdot C} = \frac{500}{s \cdot L \cdot C}$$

$$U_c(s) \cdot \left( s^2 + \frac{R}{L} \cdot s + \frac{1}{L \cdot C} \right) = U_c(0) \left( s + \frac{R}{L} \right) + \frac{500}{s \cdot L \cdot C}$$

Na enig rekenwerk (breukafsplitsen en terugtransformatie) wordt de vergelijking voor de condensator spanning  $U_c(t)$ :

$$U_c(t) = A + B e^{-\left( \frac{R}{L} + \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{4}{L \cdot C}} \right) \cdot t} + C \cdot e^{-\left( \frac{R}{L} - \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{4}{L \cdot C}} \right) \cdot t}$$

met

$$A = 500$$

$$B = -\frac{1}{2} U_g \left( 1 + \frac{R}{L \sqrt{\left( \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{4}{L \cdot C}}} \right)$$

$$C = -\frac{1}{2} U_g \left( 1 - \frac{R}{L \sqrt{\left( \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{4}{L \cdot C}}} \right)$$

Na substitutie van de waarden van  $U_g$ ,  $R$ ,  $L$  en  $C$  vindt men:

$$U_c(t) = 500 - 500 e^{-18 \frac{3}{4} \cdot t} \cdot \sin(428 \cdot t + 1,52) = 500 (1 - e^{-18 \frac{3}{4} \cdot t} \cdot \cos 428 \cdot t)$$

$$\text{met } R = 0,3 \qquad C = 680 \text{ F} \qquad L = 8 \text{ mH} \qquad U_g = 500 \text{ V}$$

De vorm is getekend in figuur 1, deel AB.  
Spanning  $U_c$  slingeret niet uit doordat diode  $D_1$  in sper gaat zodra de stroom terug wil stromen.

### 2.3. Het symmetrische leggen van de spanning

Om oscillaties tijdens de ontlading van  $C_1$  tegen te gaan wordt de opgeslingerde spanning symmetrisch om de nul gelegd.

Dit gebeurt door middel van  $R_2$ ,  $C_2$  en  $T_2$ .

Een meerschakeling zorgt er voor dat, zodra de spanning symmetrisch is, één elektrodepaar wordt aangestuurd, waarna  $C_1$ , die nog steeds zijn totale lading heeft vanwege de diode, zich kan ontladen.

De ontlading van condensator  $C_2$  gebeurt volgens de formule:

$$U(t)_{C_2} = U_{\max} e^{-\frac{t}{T}}$$

met

$$T = R.C \quad ( )$$

en

$U_{\max}$  = de maximale opgeslingerde spanning van een puls.

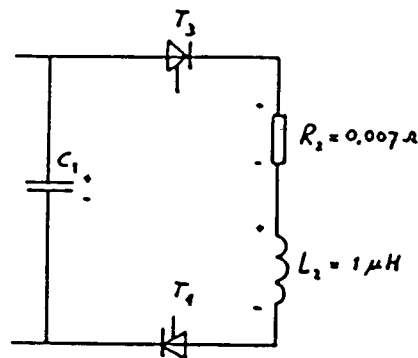
Na substitutie van de waarden van  $R$ ,  $C$  en  $U_{c12}$  wordt de vergelijking:

$$U(t)_{C_2} = 936 \cdot e^{-\frac{t}{0,77}} \quad (II)$$

Dit gedeelte is BC getekend in figuur 1.

### 2.4. Ontladen van de eerste puls

Het ontladen van condensator  $C_1$  gebeurt ook volgens een slingerkring. De schakeling is getekend in figuur 3.



figuur 3 ontladecircuit.

Als  $C_1$  zich ontladst kan de stroom maar één kant op door de thyristoren  $T_3$  en  $T_4$ .

De spanning slingert door en  $C_1$  wordt hierdoor negatief geladen.

Er geldt:

$$U_c(t) = U_r + U_1 \quad i = -C \frac{dU}{dt} \text{ (negatief omdat } C_1 \text{ nu een actief deel is in de schakeling)}$$

$$U_c(t) = i.R + L \frac{di}{dt}$$

$$U_c(t) = -R.C U_c' - L.C U_c''$$

Met Laplace-transformatie is  $U_c(t)$  op te lossen.

Na enig rekenwerk volgt:

$$U_c(t) = 985 e^{-3500.t} \sin(11608.t + 1,28)$$

Dit gedeelte is deel CD van figuur 1.

### 2.5. Het laden van de tweede puls

Het laadproces is precies hetzelfde als het laadproces tijdens de eerste puls met het verschil dat er nu voor de tweede orde differentiaal vergelijking

$$U_c'' + \frac{R}{L} U_c' + \frac{U_c}{L.C} = \frac{U_g}{L.C}$$

andere beginvoorwaarden gelden.

Zo is  $U_c(0)$  nu  $-900$  V geworden, zie figuur 4.

$U_c'(0)$  is echter nul omdat er "voor" de ontlading geen stroom loopt.

$$U_c' = \frac{d}{C dt} \int i dt \quad \text{als } i = \text{constant} \quad U_c'(t) = 0$$

De formule voor  $U_c(t)$  gaat dan over in:

$$U_c(t) = 500 - 1400 e^{-18\frac{3}{4}.t} \cos 428.t$$

Dit gedeelte is EF in figuur 1.

### 2.6. Het symmetrisch leggen van de spanning

Gaat analoog als beschreven in 2.3. alleen  $U_{\max} = 1725$  V.

De formule wordt dan:

$$U_{c_2} = U_{\max} e^{-\frac{t}{\tau}} = 1725 e^{-\frac{t}{0,77 \text{ m}}}$$

Dit gedeelte is FG in figuur 1.

### 2.7. Het ontladen van de tweede puls

Hier valt ook weinig nieuws over te vertellen.

Omdat de beginvoorwaarden steeds veranderen, veranderen ook elke keer de amplituden van de pulsen.

De ontlaadpuls voldoet dan aan:

$$U_c(t) = 1487 e^{-3500.t} \cdot \sin(11608.t + 1,28)$$

Dit gedeelte is GH in figuur 1.

### 3. DE STROOMPULSVORM

Voor de stroomvorm is elke keer net zoiets als de spanningspuls af te leiden. Makkelijker is om met de formule

$$i_c = C \frac{dU}{dt} \quad \text{te werken.}$$

Door de laad- en ontlaadspanning te differentieëren en met C te vermenigvuldigen wordt een uitdrukking voor de stroom gevonden.

Deze zijn dan achtereenvolgens:

Laadstroom 1e puls	$145 \cdot e^{-18\frac{3}{4} \cdot t} \cdot \sin(428 \cdot t)$
Ontlaadstroom 1e puls	$8069 \cdot e^{-3500 \cdot t} \cdot \sin(11608 \cdot t)$
Laadstroom 2e puls	$414 \cdot e^{-18\frac{3}{4} \cdot t} \cdot \sin(428 \cdot t)$
Ontlaadstroom 2e puls	$12266 \cdot e^{-3500 \cdot t} \cdot \sin(11608 \cdot t)$

De komplette pulsvorm is getekend samen in één figuur met de spanningspulsvorm in figuur 4.

### 4. RESULTATEN EN KONKLUSIES VAN DE BEREKENINGEN

#### 4.1. Resultaten en konklusies van de spanningsvorm

Uit de berekeningen van de spanningsvorm valt op dat een stabiele situatie niet optreedt op de manier zoals dat in de praktijk wel gebeurt.

De spanning slingert steeds hoger op omdat de beginvoorwaarden telkens veranderen.

In de praktijk bereikt de puls een eindwaarde, bij een generatorspanning van 500 V, van 2000 V. Er is dus een begrenzende faktor. Gekonstateerd werd dat de schakeling op de stroom vastloopt.

Bij het laadproces staat de tijd T vast door de verhouding:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \text{Im} \left( \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R^2}{L} - \frac{4}{L \cdot C}} \right) = 428.$$

(Zoals het hier staat is de wortel negatief. Vandaar ook dat het imaginaire gedeelte genomen wordt).

$$T = \frac{2\pi}{428} = 0,015 \text{ s} = 15 \text{ ms.}$$

Het maximale ladingtransport  $g = I \cdot t$  ligt hiermee ook vast, omdat I begrensd wordt tijdens het laden door bijvoorbeeld de stroombegrenzing van de voeding of door vermogensbegrenzing van de generator.

#### 4.2. Berekenende tijden

De exakte tijden van de pulsduur zijn bekend.

Zo duurt

- de oplaadcyclus	7,2 ms
- de ontlaadcyclus	0,25 ms
- ontladen van $C_2$	0,5 ms

De totale pulsduur wordt dan 7,95 ms

Bij een frequentie van 100 Hz, met een periodetijd van 10 ms,

volgt de volgende puls na ongeveer 2 ms.

#### 4.3. Resultaten en konklusies van de stroomvorm

Uit de stroomvorm is de maximale  $dI/dt$  te bepalen.

Deze waarde is belangrijk omdat door hoge stroomontlaadpieken de thyristoren defekt kunnen raken.

De maximale  $dI/dt$  volgt uit onderstaande berekening.

Daar de spanning in de praktijk niet boven de 2000 V uitkomt, wordt de  $dI/dt$  max. bepaald van de eerste ontladpuls.

$$I_c(t)_{\text{ontl}} \approx 8069 e^{-3500 \cdot t} \sin 11608 \cdot t$$

De  $\frac{dI_c}{dt}$  is maximaal op  $t = 0$  in de ontladcyclus.

$$\begin{aligned} \frac{dI_c}{dt} &= 8069 \frac{de^{-3500 \cdot t} \sin 11608 \cdot t}{dt} \\ &= 8069 \cdot 3500 \cdot e^{-3500 \cdot 0} (3,3 \cos 11608 \cdot 0 - \sin 11608 \cdot 0) \end{aligned}$$

Op  $t = 0$  geldt:

$$\frac{dI_c}{dt} = \frac{dI_c}{dt}_{\text{max}} = 8069 \cdot 3500 \cdot 3,3 = 93,2 \text{ A}/\mu\text{s}$$

Voor de gebruikte thyristoren die deze stroom moeten schakelen, te weten de SKT 630/22E van Semikron, geldt een  $dI/dt$  max van  $> 125 \text{ A}/\mu\text{s}$ .

Normaal is de  $\frac{dI}{dt}_{\text{max}} = 125 \text{ A}/\mu\text{s}$ , maar door de fabriek zijn thyristoren uit die serie uitgezocht met een hogere  $dI/dt$  waarde.



Uitvoerige berekeningen van stroom en spanningspulsvorma. Het laden van de eerste puls

$$U_g = L.C U'' + R.C U_c' + U_c = U'' + \frac{R}{L} U' + \frac{1}{L.C} \cdot U = \frac{1}{L.C} \cdot U_g.$$

Met Laplace-transformatie:

$$U_c(s) \cdot s^2 - s U_c(0) - U_c'(0) + U_c(s) \frac{R}{L} \cdot s - \frac{R}{L} \cdot U_c(0) + \frac{U_c(s)}{L.C} = \frac{500}{S.L.C}$$

$$U_c(s) \left( s^2 + \frac{R}{L} \cdot s + \frac{1}{L.C} \right) = \frac{500}{S.L.C} + \left( s - \frac{R}{L} \right) U_c(0) + U_c'(0)$$

Bij de eerste puls zijn  $U_c(0)$  en  $U_c'(0)$  beide OV.

$$U_c(s) = \frac{500}{\left( s^2 + \frac{R}{L} \cdot s + \frac{1}{L.C} \right) \cdot L.C.S} \quad (I)$$

Met de a.b.c.-formule vindt men 2 oplossingen voor s, zodat  $U_c(s)$  wordt:

$$U_c(s) = \frac{500}{\left( s + \frac{R}{2L} - \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{4}{L.C}} \right) \cdot \left( s + \frac{R}{2L} + \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{4}{L.C}} \right) \cdot L.C.S}$$

Met breukafsplitsen is te schrijven:

$$U_c(s) = \frac{A}{S} + \frac{B}{\left( s + \frac{R}{2L} - \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{4}{L.C}} \right)} + \frac{C}{\left( s + \frac{R}{2L} + \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{4}{L.C}} \right)}$$

$$A \left( s + \frac{R}{2L} - \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{4}{L.C}} \right) \left( s + \frac{R}{2L} + \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{4}{L.C}} \right)$$

$$+ C.S. \left( s + \frac{R}{2L} - \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{4}{L.C}} \right) + B.S. \left( s + \frac{R}{2L} + \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{4}{L.C}} \right) = \frac{500}{L.C}$$

$$A S^2 + B S^2 + C S^2 = 0 \quad A + B + C = 0 \quad (II)$$

$$A \cdot \frac{R}{L} \cdot S + C \cdot \left( \frac{R}{2L} - \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{4}{L.C}} \right) \cdot S + B \cdot \left( \frac{R}{2L} + \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{4}{L.C}} \right) \cdot S = 0 \quad (III)$$

$$A = 500 \quad (IV)$$

Uit deze 3 vergelijkingen volgt dat:

$$B = -250 \times \left( 1 + \frac{R}{L \sqrt{\left( \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{4}{L.C}}} \right)$$

$$C = -250 \times \left( 1 - \frac{R}{L \sqrt{\left( \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{4}{L.C}}} \right)$$

Na terugtransformatie in het t-domein wordt  $U_c(t)$ :

$$U_c(t) = A + B.e^{-\left(\frac{R}{2L} - \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 - \frac{4}{L.C}}\right).t} + C.e^{-\left(\frac{R}{2L} + \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 - \frac{4}{L.C}}\right).t}$$

Invullen van de waarden van R, L en C levert met

$$R = 0,3$$

$$L = 8 \text{ mH}$$

$$C = 680 \text{ F}$$

$$U_c(t) = 500 - 250 \left(1 + \frac{0,3}{6,8j}\right)e^{-(18\frac{3}{4} - 428j).t} - 250 \left(1 - \frac{0,3}{6,8j}\right)e^{-(18\frac{3}{4} + 428j).t}$$

$$U_c(t) = 500 - 250 e^{-18\frac{3}{4}.t} (1 - 0,044j)e^{428j.t} + (1 + 0,044j)e^{-428j.t}$$

=

$$500 - 250.e^{-18\frac{3}{4}.t} (1 - 0,044j) (\cos 428.t + j \sin 428.t) + (1 + 0,044j) (\cos 428.t - j \sin 428.t).$$

=

$$500 - 250.e^{-18\frac{3}{4}.t} (2 \cos 428.t + 0,088 \sin 428.t)$$

=

$$500 (1 - e^{-18\frac{3}{4}.t} \sin (428.t + 1,52)) = 500 (1 - e^{-18\frac{3}{4}.t} \cos 428.t) \text{ (V)}$$

#### b. Het ontladen van de eerste puls

$$U_c = -R.C \frac{dU_c}{dt} - L.C \frac{d^2U_c}{dt^2}$$

$$U_c(t_1) = 963 \text{ V.}$$

$$i = -C \frac{dU}{dt}$$

$$U_c(s).L.C.S^2 + R.C.sU_c(s) + U_c(s) - S.L.C.U_c(t_1) - R.C.U_c(t_1) = 0$$

$$U_c(s).(L.C.S^2 + R.C.S + 1) = U_c(t_1) (S.L.C + R.C) = 963 (S.L.C + R.C)$$

$$U_c(s) = \frac{963 (s + \frac{R}{L})}{s^2 + \frac{R}{L}.s + \frac{1}{L.C}} = \frac{963. (s + \frac{R}{L})}{(s + \frac{R}{2L} - \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 - \frac{4}{L.C}}) (s + \frac{R}{2L} + \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 - \frac{4}{L.C}})}$$

$$U_c(s) = \frac{A}{(s + \frac{R}{2L} - \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 - \frac{4}{L.C}})} + \frac{B}{(s + \frac{R}{2L} + \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 - \frac{4}{L.C}})} \text{ (VI)a}$$

$$A = -\frac{1}{2}U_c(t_1) \times \left(1 + \frac{R}{L\sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 - \frac{4}{L.C}}}\right) = 481,5 - 143j$$

$$B = -\frac{1}{2}U_c(t_1) \times \left(1 - \frac{R}{L\sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 - \frac{4}{L.C}}}\right) = 481,5 + 143j$$

$$U_c(t) = (481,5 - 143j)e^{-(3500 - 11608j).t} + (481,5 + 143j)e^{-(3500 + 11608j).t}$$

$$= e^{-3500.t} (481,5 - 143j) \cdot \left\{ \begin{array}{l} \cos(11608.t) + j \sin(11608.t) \\ \cos(11608.t) - j \sin(11608.t) \end{array} \right\} + (481,5 + 143j) \cdot \left\{ \begin{array}{l} \cos(11608.t) + j \sin(11608.t) \\ \cos(11608.t) - j \sin(11608.t) \end{array} \right\}$$

$$= e^{-3500.t} \cdot (936 \cdot \cos(11608.t) + 286 \cdot \sin(11608.t))$$

$$= 985 \cdot e^{-3500.t} (\sin(11608.t + 1,28)) \text{ Volt.} \quad \text{(VI)b}$$

c. Het laden van de tweede puls

Bij formule I wordt de beginvoorwaarde  $U_c(0) = -900 \text{ V}$  in plaats van  $U_c(0) = 0 \text{ V}$ .

$U_c'(0) = 0$  blijft 0.

Formule I gaat dan over in:

$$U_c(s) = \frac{500}{s.L.C (s^2 + \frac{R}{L}.s + \frac{1}{L.C})} - \frac{900 (s + \frac{R}{L})}{(s + \frac{R}{2L} + \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 - \frac{4}{L.C}}) (s + \frac{R}{2L} - \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 - \frac{4}{L.C}})}$$

Het linker deel is bekend, het rechter deel wordt nu:

$$\frac{A}{(s + \frac{R}{2L} + \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 - \frac{4}{L.C}}} + \frac{B}{(s + \frac{R}{2L} - \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 - \frac{4}{L.C}})}$$

$$A = -900 - B \quad \text{(VII)}$$

$$A \left(\frac{R}{2L} - \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 - \frac{4}{L.C}}\right) + B \left(\frac{R}{2L} + \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 - \frac{4}{L.C}}\right) = -\frac{900 R}{L} \quad \text{(VIII)}$$

Uit (VIII) (VII) volgt:

$$A = -450 - 19,71j$$

$$B = -450 + 19,71j$$

$$U_c(t) = 500 (1 - e^{-18\frac{3}{4}.t} \cos 428.t) + (-450 - 19,71j)e^{-(18\frac{3}{4} - 428j).t} + (-450 + 19,71j)e^{-(18\frac{3}{4} + 428j).t}$$

$$\begin{aligned}
U_c(t) &= \dots + e^{-18\frac{3}{4}.t} (-450 - 19,7j) (\cos 428t + j \sin 428.t) + \\
&\quad (-450 + 19,7j) \cdot (\cos 428.t - j \sin 428.t) \\
&= \dots + e^{-18\frac{3}{4}.t} (-900 \cos 428.t + 39,4 \sin 428.t) \\
&\approx 500 (1 - e^{-18\frac{3}{4} \cos 428.t}) + 900 e^{-18\frac{3}{4}.t} \cos 428.t \\
U_c(t) &\approx 500 - 1400 \cdot e^{-18\frac{3}{4}.t} \cos 428.t \text{ Volt.} \quad (\text{IX})
\end{aligned}$$

d. Ontladen van de tweede puls

Tijdens het laadproces van de tweede puls bereikt de puls een maximum voor  $U_c = 1425 \text{ V}$ .

Het ontladen gebeurt vanaf dit niveau.

Het enige wat echter verandert, is de amplitude van de sinus vergeleken met de ontlaadpuls van de eerste puls.

Er geldt nu voor de factoren A en B uit formule (VI)a:

$$\begin{aligned}
A + B &= 1425 \quad \text{of} \quad A = 1425 - B \\
A \left( \frac{R}{2L} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 - \frac{4}{L.C}} \right) + B \left( \frac{R}{2L} - \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 - \frac{4}{L.C}} \right) &= \frac{1425 R}{L}
\end{aligned}$$

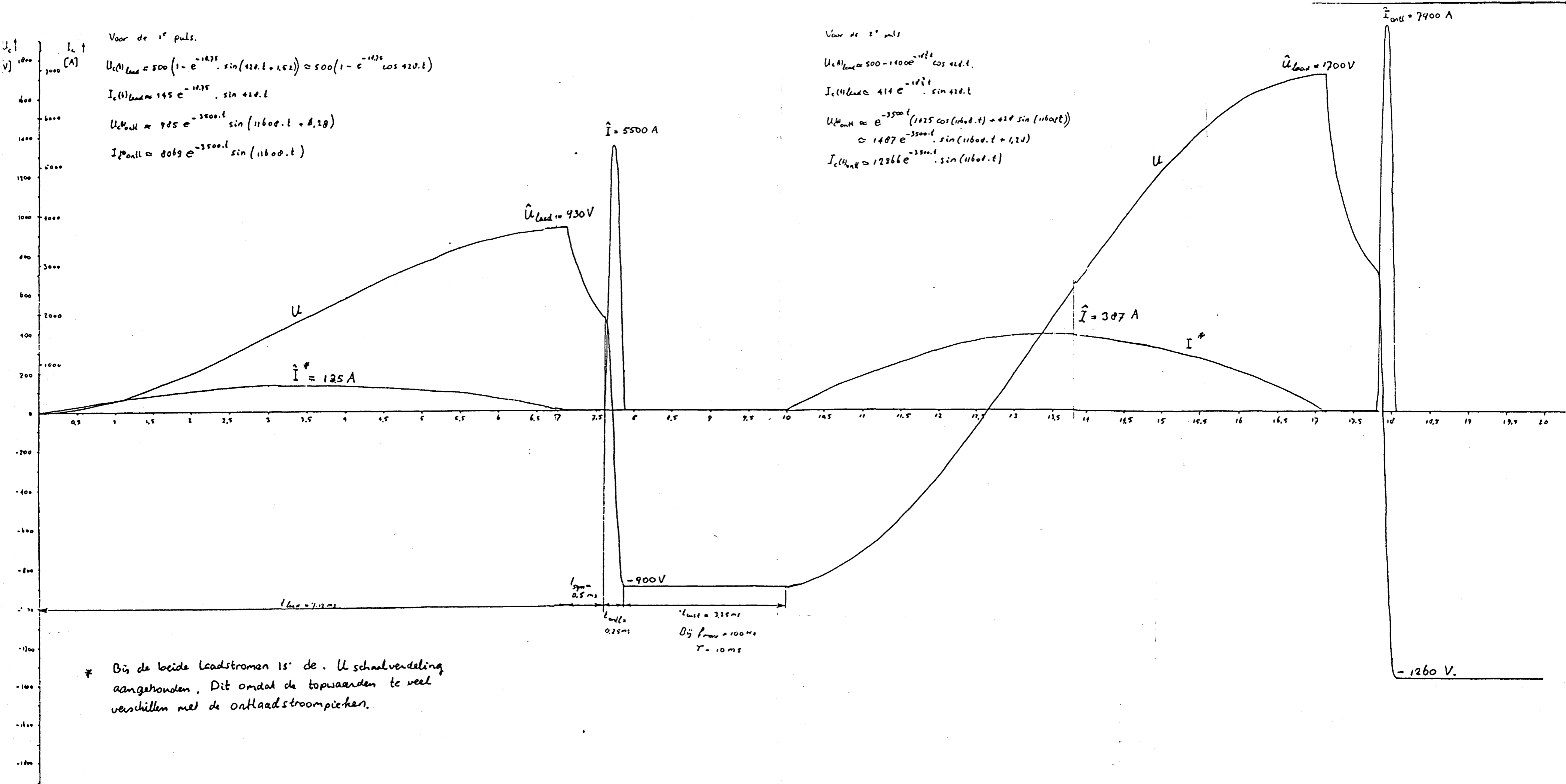
Uit deze twee vergelijkingen volgt voor A en B:

$$A = 712,5 - 214j$$

$$B = 712,5 + 214j$$

$$\begin{aligned}
U_c(t) &= (712,5 - 214j)e^{-(3500 - 11608j).t} + (712,5 + 214j)e^{-(3500 + 11608j).t} \\
&= e^{-3500.t} (1425 \cos (11608.t) + 428 \sin (11608.t))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_c(t) &= 1487 e^{-3500.t} \cdot \sin (11608.t + 1,28) \\
&\approx 1487 e^{-3500.t} \cdot \cos 11608.t \text{ Volt.} \quad (\text{X})
\end{aligned}$$



Voor de 1<sup>e</sup> puls.

$$U_c(t)_{\text{load}} = 500 (1 - e^{-1475t} \cdot \sin(420t + 1.52)) \approx 500 (1 - e^{-1475t} \cos 420t)$$

$$I_c(t)_{\text{load}} = 145 e^{-1475t} \cdot \sin 420t$$

$$U_c(t)_{\text{ontl}} = 985 e^{-3500t} \sin(11600t + 8.28)$$

$$I_c(t)_{\text{ontl}} = 8069 e^{-3500t} \sin(11600t)$$

Voor de 2<sup>e</sup> puls

$$U_c(t)_{\text{load}} = 500 - 1400 e^{-1475t} \cos 420t$$

$$I_c(t)_{\text{load}} = 414 e^{-1475t} \cdot \sin 420t$$

$$U_c(t)_{\text{ontl}} = e^{-3500t} (1025 \cos(11600t) + 420 \sin(11600t))$$

$$\approx 1407 e^{-3500t} \cdot \sin(11600t + 1.21)$$

$$I_c(t)_{\text{ontl}} = 12366 e^{-3500t} \cdot \sin(11600t)$$

\* Bij de beide loadstromen is de U schaalverdeling aangehouden. Dit omdat de topwaarden te veel verschillen met de ontlaadstroompieken.

-1260 V.