

*Netzurückwirkungen hervorgerufen durch den  
Betrieb der Stromversorgungsanlagen für  
Plasmaheizung und Magnetfeld des  
Kernfusionsexperiments W7X*

F. Werner

IPP 2/336

März 1997



**MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK**

85748 GARCHING BEI MÜNCHEN

**MAX - PLANCK - INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK**

**GARCHING BEI MÜNCHEN**

***Netzurückwirkungen hervorgerufen durch den  
Betrieb der Stromversorgungsanlagen für  
Plasmaheizung und Magnetfeld des  
Kernfusionsexperiments W7X***

**F. Werner**

**IPP 2/336**

**März 1997**

Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem  
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und der Europäischen Atomgemeinschaft über die  
Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Plasmaphysik durchgeführt.

## **Abstract**

Zum Betrieb der W7X Plasma Heizapparaturen sind Hochspannungs- Gleichstromversorgungen mit einer Gesamtleistung von 40 MVA erforderlich. Es ist geplant 12- pulsige Transformator- Gleichrichteranlagen zu verwenden. Diese Anlagen erzwingen einen nicht-sinusförmigen Netzstrom dessen Oberschwingungen entsprechende Netzspannungsverzerrungen verursachen. Zur Bestimmung des Ausmaßes dieser Verzerrungen, werden die Rückwirkungen der Oberschwingungsströme auf das Wechselstromnetz mittels numerischer Netzwerkanalyse untersucht. Hierbei wird sowohl der 20 kV Anschlußpunkt der Gleichrichteranlagen als auch der 110 kV Netzanschluß des Netzbetreibers betrachtet. Ferner wird die Auslegung der zur Blindleistungskompensation und zur Bedämpfung der Stromoberwellen projektierten LC Saugkreise überprüft. Der zusätzliche Betrieb der 1.5 MVA Magnetstromversorgungen trägt ebenfalls, wenn auch in sehr geringem Maße, zur Netzspannungsverzerrung bei. Der Einfluß dieser ebenfalls 12- pulsigen Gleichrichteranlagen wird überprüft.

Die numerischen Berechnungen werden mit Hilfe des Netzwerksimulationsprogramms 'Pspice' durchgeführt. In einer Ersatzschaltung werden das Versorgungsnetz und die Transformatoren durch ihre Induktivitäten bzw. Ersatzinduktivitäten dargestellt. Die Gleichrichtereinheiten werden durch eine Anzahl von Stromquellen, die die Stromüberschwingungen in Amplitude, Frequenz und Phase erzeugen, simuliert. Die Oberschwingungsamplituden der Stromversorgungen für die Plasmaheizung sind in Form von Meßwerten des Herstellers gegeben. Für die Magnetstromversorgungen werden die Stromharmonischen aus der Fourierzerlegung des theoretischen, treppenförmigen Stromverlaufs  $I(t)$  gewonnen.

Die LC Saugkreise bewirken, daß die Kennwerte zur Beurteilung der Spannungsqualität weit unter den zulässigen Werten der VDE Empfehlungen VDE 0160 liegen.

The operation of the W7-X plasma heating devices requires high voltage DC power supplies with a total electrical power of 40 MVA. For this purpose twelve-pulse AC/DC converters are projected. These converters enforce a non sinusoidal line current, whose harmonics are causing corresponding line voltage distortions. To evaluate the extent of these distortions, the reaction of the harmonic currents on the AC line, is investigated by numerical network analysis. This is done for both, the 20 kV- junction point of the converters and the 110 kV- line terminal of the electricity supply company. Furthermore the design of LC series-resonant circuits, projected for power factor correction and damping of the harmonic content of the line voltage, has been verified. The additional operation of the 1.5 MVA magnet power supplies also contributes, even though to a much smaller extent, to the line voltage distortion. The influence of these twelve-pulse AC/DC converters was investigated too.

The numerical calculations have been done with the aid of the network simulation program 'Pspice'. In an equivalent circuit the transmission line network and the transformers are represented by their inductances respectively equivalent inductances. The rectifier units are simulated by a number of current sources, producing the current harmonics in amplitude, frequency and phase. The harmonics amplitudes of the plasma heating power supplies are measured values given by the manufacturer. For the magnet power supplies, the harmonics are derived from the theoretical step like  $I(t)$  current shape by Fourier series decomposition.

Due to the action of the LC circuits the achieved characteristic voltage quality values are far below the permissible values corresponding to the recommendations of VDE 0160.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Veranlassung</b>	<b>3</b>
<b>2. Aufgabenstellung</b>	<b>3</b>
<b>3. Lösungsweg</b>	<b>3</b>
<b>4. Daten</b>	
4.1 Speisendes Netz	5
4.2 Stromversorgung Plasmaheizung	5
4.3 Stromversorgung SL Magnet	6
4.4 Saugkreise	6
<b>5. PSpice Eingabedaten</b>	
5.1 PSM Stromquellen	7
5.2 Umspanntrafo 110/20 kV	8
5.3 Spannungsquelle	8
5.4 Freileitung	8
5.5 MPS Stromquellen	9
<b>6. PSpice Netzwerkanalyse</b>	
6.1 Ergebnisse	11
6.2 Auswertung	13
<b>7. Zusammenfassung</b>	<b>14</b>
<b>8. Literatur</b>	<b>14</b>

## 1. Veranlassung

Der Aufbau des Kernfusionsexperiments W7X in der IPP Zweigstelle Greifswald erfordert die Bereitstellung der zum Betrieb der Anlage benötigten elektrischen Energie. Es ist geplant, das Institut über eine 110 kV Freileitung aus dem Netz der Hanseatischen Energieversorgungs AG (HEVAG) zu versorgen. Der überwiegende Teil des Energiebedarfs wird zur Gleichstromversorgung diverser Plasma Heizapparaturen verwendet. Die dort zum Einsatz kommenden Stromrichteranlagen verursachen im speisenden Netz Strom- und Spannungsüberschwingungen, die zu erhöhten Verlusten und zu unzulässigen Störungen anderer Verbraucher führen können. In geringerem Maße sind auch die Gleichstromversorgungen für das supraleitende Magnetsystem an diesen Effekten beteiligt. Alle anderen leistungselektronischen Geräte sind vernachlässigbar klein. Um diese unerwünschten Netzzrückwirkungen durch geeignete Maßnahmen zu reduzieren, ist es nötig sie quantitativ zu erfassen.

## 2. Aufgabenstellung

Als Hochspannungsgleichstromversorgungen für die W7X Plasmaheizsysteme ICRH, ECRH und NBI [1] sind in dieser Betrachtung PSM's (Pulse Step Modulator) der Fa. Thomcast [2] vorgesehen. Im Prinzip handelt es sich hierbei um den Parallelbetrieb von zwei 6- pulsigen Transformatorgleichrichtereinheiten in Dy11- und Yy0 Schaltung, die aus dem 20 kV Netz des IPP versorgt werden. Aus der 30° Phasenverschiebung der Primärwicklungen resultiert eine Anlage mit 12- pulsiger Netzzrückwirkung. Jeder Transformator besitzt 40 Sekundärwicklungen pro Phase, wobei jede 3- Phasen Sekundärwicklung ein PSM- Gleichrichtermodul versorgt. Durch Zu- bzw. Abschalten einzelner Module der Serienschaltung mittels IGBT's erfolgt die Steuerung der Anlage. Die Phasenlage des Netzstromes ist dadurch, unabhängig von der Aussteuerung der Anlage, konstant.

Als Magnet Power Supplies (MPS) zur Versorgung des SL Magnetsystems sind Transformator- Stromrichteranlagen in Doppelstern Saugdrosselschaltung [3] mit ebenfalls 12- pulsiger Netzzrückwirkung vorgesehen.

Stromrichter entnehmen dem speisenden Netz nicht sinusförmigen Strom. Die Oberschwingungen dieses Stromes verursachen an den Netzimpedanzen Spannungsabfälle, die die sinusförmige Netzspannung überlagern und verzerren, d.h. deren Qualität mindern.

Die Aufgabe besteht darin, an Hand einer geeigneten Ersatzschaltung die PSM-Netzzrückwirkungen sowohl auf der 110 kV- als auch auf der 20 kV Ebene des Netzes zu berechnen und zu bewerten. Ferner ist die Wirkung von LC- Saugkreisen zur Blindleistungskompensation und zur Bedämpfung der Stromüberschwingungen zu untersuchen sowie die Blindleistungsaufnahme der Kompensationskondensatoren zu berechnen. Der Einfluß der Magnetversorgung (MPS) ist zu überprüfen.

## 3. Lösungsweg

Zur Untersuchung der Netzzrückwirkungsproblematik wird das Netzwerksimulationsprogramm PSPICE verwendet. Die zu untersuchende 1- phasige Ersatzschaltung ist in Abb. 1 dargestellt. Der vom PSM Gleichrichter erzwungene überschwingungsbehaftete Strom  $I_{(PSM)}$  wird durch eine Anzahl paralleler Stromquellen in der Frequenz der Grundschwingung sowie der zu berücksichtigenden Oberschwingungen simuliert. Die Frequenzen der charakteristischen Stromharmonischen sind durch die Pulszahl  $p$  des Stromrichters gegeben.

$$v = k \cdot p \pm 1 \quad (k = 1, 2, 3, \text{ usw.})$$

Die Ordnungszahl  $v$  gibt an mit welchem Vielfachen der Grundfrequenz die jeweilige Oberschwingung vertreten ist. Die 12-polige PSM Gleichrichteranlage erzeugt also demnach charakteristische Oberschwingungsströme der Ordnungszahlen  $v = 11, 13, 23, 25$  usw.. Die Amplituden dieser Stromharmonischen sind durch Meßwerte der Herstellerfirma Thomcast gegeben.

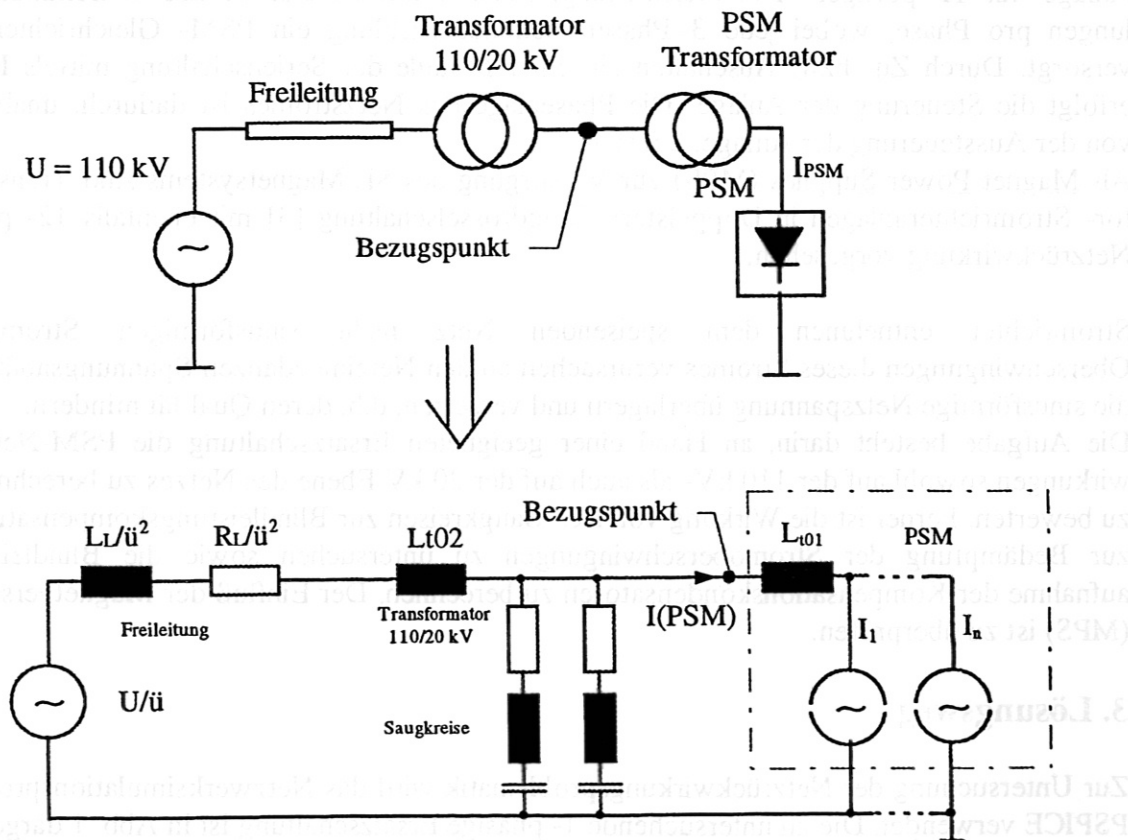
Das 110 kV Netz wird durch seine aus der Kurzschlußleistung ermittelte Induktivität, der 110/20 kV Umspanntransformator sowie der PSM-Transformator werden durch ihre entsprechenden Streuinduktivitäten dargestellt.

Die sinusförmig angenommene Netzspannung wird von einer 50 Hz Spannungsquelle erzeugt. Bezugspunkt ist die Sekundärseite des Umspanntransformators, d.h. Spannung und Induktivitäten der 110 kV Seite sind unter Berücksichtigung des Übersetzungsverhältnisses auf die 20 kV Seite transformiert.

Die Saugkreise befinden sich auf der 20 kV Seite des Umspanntransformators.

Die Magnetstromversorgungen MPS werden in der gleichen Weise simuliert wie die PSM's. Phasenlage und Amplitude der Oberschwingungsströme werden dabei aus der Fourierzerlegung des theoretischen treppenförmigen Stromverlaufs der Doppelstern-Saugdrosselschaltung der MPS ermittelt.

**Abbildung 1: Ersatzschaltbild**



Daten:			Bemerkungen:
U/ü	16.33	kV	Phasenspannung, Scheitelwert, transformiert
I <sub>1</sub>	272.17	A	Strom, Grundschwingung, Scheitelwert
L <sub>102</sub>	2.17	mH	Streuinduktivität, Umspanntrafo, sekundärseitig
L <sub>101(PSM)</sub>	15.3	mH	Streuinduktivität, PSM-Trafo, primärseitig
L <sub>L</sub> /ü <sup>2</sup>	1.75	mH	Leitungsinduktivität, transformiert
R <sub>L</sub> /ü <sup>2</sup>	302	mΩ	Leitungswiderstand, transformiert

Zur Beurteilung der Qualität der Netzspannung werden folgende Kenngrößen ermittelt:

Grundschwingungsgehalt (nach DIN 40110)

Effektivwertabweichung

Augenblicksabweichung

Oberschwingungsanteil bezogen auf die Grundschwingung

Die Bewertung erfolgt nach VDE 0160.

## 4. Daten

### 4.1 Speisendes Netz

Betrachtet wird die erste Ausbaustufe der vom Ingenieurbüro Müller & Bleher GmbH im Rahmen der Bauplanung für das Teilinstitut Greifswald vorgelegten Variante 2 [4].

110 kV Netz:

Kurzschlußleistung  $S_k = 640 \text{ MVA}$

Umspanntransformator 110/20 kV:

Nennleistung  $S_N = 41 \text{ MVA}$

Nennstrom  $I_N = 1184 \text{ A}$

Kurzschlußstrom  $I_K = 16.9 \text{ kA}$

Kurzschlußspannung  $u_k = 7 \%$

### 4.2 Stromversorgung Plasmaheizung (PSM)

Zur Hochspannungsversorgung der Plasmaheizungen sind 6 PSM's der Fa. Tomcast vorgesehen [4].

Nennleistung (6 PSM)  $S_N = 40 \text{ MVA}$

Netzspannung  $U = 20 \text{ kV}$

Leistungsfaktor  $\cos \varphi = 0.95$

Kurzschlußspannung PSM Trafo  $u_k = 8 \%$

Stromüberschwingungen

$$\begin{aligned} I_{11}/I_1 &= 4.77 \% \\ I_{13}/I_1 &= 3.21 \% \\ I_{23}/I_1 &= 0.88 \% \\ I_{25}/I_1 &= 0.67 \% \\ I_{35}/I_1 &= 0.34 \% \\ I_{37}/I_1 &= 0.31 \% \end{aligned}$$

### 4.3 Stromversorgung SL Magnet (MPS)

Die Spulensysteme 1-5 werden von je einem MPS versorgt. Ein MPS besteht aus einer Transformator-Stromrichteranlage in Doppelstern-Saugdrosselschaltung mit 12 poliger Netzrückwirkung und folgenden Daten:

Anschlußwechselspannung	$U = 20 \text{ kV}$
Gleichspannung	$U_d = 15 \text{ V}$
Gleichstrom	$I_d = 20 \text{ kA}$
Leistung	$S = 0.3 \text{ MVA}$
Kurzschlußspannung Trafo	$u_k = 8 \%$

Netzseitiger Stromverlauf (Treppenform) entspricht dem Parallelbetrieb von 2 sechspulsigen Gleichrichtern der Schaltgruppen F2 und G2.

### 4.4 Saugkreise

Zur Blindleistungskompensation und OberschwingungsfILTERUNG sind LC Saugkreise vorgesehen. Sie sind auf die Stromharmonischen mit den Ordnungszahlen  $v = 5, 7, 11, 13$  und  $23$  abgestimmt (Fa. Müller & Bleher). Die Harmonischen 5 und 7 kommen im PSM- Oberschwingungsspektrum nicht vor, sie werden vom Blindleistungskompensationsregler erzeugt. Zu jedem Serienresonanzkreis ist ein Widerstand in Reihe geschaltet. Die einzelnen Elemente haben folgende Werte:

$v$	$C_v/\mu\text{F}$	$L_v/\text{mH}$	$R_v/\text{m}\Omega$
5	19.87	21.1	360
7	19.87	10.7	260
11	39.74	2.19	80
13	39.74	1.56	70
23	39.74	0.49	2



## 5. Berechnung der Eingabedaten für PSpice

### 5.1 PSM Stromquellen: Stromscheitelwerte, Phasenlagen, Streuinduktivität des PSM Transformators

Spannungen	$U_1 := 110 \cdot \text{kV}$	$U_2 := 20 \cdot \text{kV}$
Scheinleistung/PSM	$S := \frac{40}{6} \cdot \text{MVA}$	$S = 6.667 \cdot \text{MVA}$
Übersetzungsverhältnis $\ddot{u}$	$\ddot{u} := \frac{U_1}{U_2}$	$\ddot{u} = 5.5$
Relative Kurzschlußspannung des PSM Trafos	$u_k := 8 \cdot \%$	$u_k = 0.08$
Frequenz $f$	$f := 50 \cdot \text{Hz}$	

#### Stromscheitelwerte:

Grundschiwingung	$I_1 := \frac{S \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot U_2}$	$I_1 = 272.166 \cdot \text{A}$
11. Oberschiwingung	$I_{11} := 0.0477 \cdot I_1$	$I_{11} = 12.982 \cdot \text{A}$
13. Oberschiwingung	$I_{13} := 0.0321 \cdot I_1$	$I_{13} = 8.737 \cdot \text{A}$
23. Oberschiwingung	$I_{23} := 0.00881 \cdot I_1$	$I_{23} = 2.398 \cdot \text{A}$
25. Oberschiwingung	$I_{25} := 0.00673 \cdot I_1$	$I_{25} = 1.832 \cdot \text{A}$
35. Oberschiwingung	$I_{35} := 0.00340 \cdot I_1$	$I_{35} = 0.925 \cdot \text{A}$
37. Oberschiwingung	$I_{37} := 0.00310 \cdot I_1$	$I_{37} = 0.844 \cdot \text{A}$

#### Phasenlagen:

Grundschiwingung	$f_1 := 50 \cdot \text{Hz}$	$\phi_1 := 17.5$	
11. Oberschiwingung	$f_{11} := 550 \cdot \text{Hz}$	$\phi_{11} := \frac{f_{11} \cdot \phi_1}{f_1}$	$\phi_{11} = 192.5$
13. Oberschiwingung	$f_{13} := 650 \cdot \text{Hz}$	$\phi_{13} := \frac{f_{13} \cdot \phi_1}{f_1}$	$\phi_{13} = 227.5$
23. Oberschiwingung	$f_{23} := 1150 \cdot \text{Hz}$	$\phi_{23} := \frac{f_{23} \cdot \phi_1}{f_1}$	$\phi_{23} = 402.5$
25. Oberschiwingung	$f_{25} := 1250 \cdot \text{Hz}$	$\phi_{25} := \frac{f_{25} \cdot \phi_1}{f_1}$	$\phi_{25} = 437.5$
35. Oberschiwingung	$f_{35} := 1750 \cdot \text{Hz}$	$\phi_{35} := \frac{f_{35} \cdot \phi_1}{f_1}$	$\phi_{35} = 612.5$
37. Oberschiwingung	$f_{37} := 1850 \cdot \text{Hz}$	$\phi_{37} := \frac{f_{37} \cdot \phi_1}{f_1}$	$\phi_{37} = 647.5$

Streureaktanz $X_{t01}$ (Primärseite)	$X_{t01} := u_k \cdot \frac{U_2^2}{S}$	$X_{t01} = 4.8 \cdot \Omega$
Streuinduktivität	$L_{tPSM01} := \frac{X_{t01}}{2 \cdot \pi \cdot f}$	$L_{tPSM01} = 15.279 \cdot \text{mH}$

### 5.2 Umspanntrafo 110/20 kV, Streuinduktivität

Nennleistung $S_N$	$S_N := 41 \cdot \text{MVA}$	$S_N = 41 \cdot \text{MVA}$
Relative Kurzschlußspannung	$u_k := 7\%$	$u_k = 0.07$
Streureaktanz (Sekundärseite)	$X_{t02} := u_k \cdot \frac{U_2^2}{S_N}$	$X_{t02} = 0.683 \Omega$
Streuinduktivität	$L_{t02} := \frac{X_{t02}}{2 \cdot \pi \cdot f}$	$L_{t02} = 2.174 \cdot \text{mH}$

### 5.3 Spannungsquelle,

Phasenspannung $U$ (Scheitelwert, transformiert)	$U := \frac{U_1}{\ddot{u}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$	$U = 16.33 \cdot \text{kV}$
---	---	-----------------------------

### 5.4 Freileitungsnetzanschluß 110 kV

Kurzschlußleistung $S_K$	$S_{Kmax} := 1.52 \cdot 10^3 \cdot \text{MVA}$ $S_{Kmin} := 640 \cdot \text{MVA}$ $S_K := S_{Kmin}$	
Impedanz $Z_L$	$Z_L := \frac{U_1^2}{S_K}$	$Z_L = 18.906 \cdot \Omega$
Verhältnis $R_L/X_L$ (aus Literatur)	$v_{RX} := 0.5$	
Induktiver Widerstand $X_L$	$X_L := \frac{Z_L}{\sqrt{v_{RX}^2 + 1}}$	$X_L := 16.63 \cdot \Omega$
Induktivität $L_L$	$L_L := \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f}$	$L_L = 52.935 \cdot \text{mH}$

Induktivität (transformiert)	$L'_L := \frac{L_L}{\dot{u}^2}$	$L'_L = 1.75 \text{ mH}$
Widerstand $R_L$	$R_L := V_{RX} \cdot X_L$	$R_L := 9.14 \cdot \Omega$
Widerstand $R'_L$ (transformiert)	$R'_L := \frac{R_L}{\dot{u}^2}$	$R'_L = 0.302 \Omega$

## 5.5 MPS Stromquellen: Stromscheitelwerte, Phasenlagen, Streuinduktivität des MPS Transformators

### 5.51 Streureaktanz $X_{t01}$ bezogen auf die Primärseite des Gleichrichtertransformators

Nennleichstrom	$I_{da} := 20 \cdot \text{KA}$	
Ideelle Leerlaufgleichspannung	$U_{di0} := 15 \cdot \text{V}$	
Netzwechselspannung	$U := 20 \cdot \text{kV}$	
Relative ind. Kurzschlußspannung	$u_{xt} := 8 \cdot \%$	$u_{xt} = 0.08$
Gleichstrombruttoleistung/MPS	$P_{d0} := U_{di0} \cdot I_{da}$	$P_{d0} = 0.3 \text{ MVA}$
Streureaktanz $X_{t01}$	$X_{t01} := \frac{u_{xt} \cdot U^2}{P_{d0}}$	$X_{t01} = 106.667 \cdot \text{Ohm}$
Streuinduktivität $L_{t01}$	$L_{t01} := \frac{X_{t01}}{2 \cdot \pi \cdot f}$	$L_{t01} = 339.531 \cdot \text{mH}$

### 5.52 Konstruktion des theoretischen Stromverlaufs $I_{MPS}(t)$ für die 'Flat top' Phase

Kurzschlußstrom $I_K$ des 110/20 kV Umspanntrafo	$I_K := 16.9 \cdot \text{KA}$	
Kurzschlußleistung $S_K$ des 110/20 kV Umspanntrafo	$S_K := \sqrt{3} \cdot U \cdot I_K$	$S_K = 585.433 \cdot \text{MVA}$
Leistungsverhältnis LV	$LV := \frac{P_{d0}}{S_K}$	$LV = 0.051 \cdot \%$
Flat top Strom $I_{ft}$	$I_{ft} := 16 \cdot \text{KA}$	
R Zuleitung $R_{ZL}$	$R_{ZL} := 0.15 \cdot \text{m}\Omega$	
Flat top Spannung $U_{ft}$	$U_{ft} := I_{ft} \cdot R_{ZL}$	$U_{ft} = 2.4 \cdot \text{V}$

Aussteuerungswinkel  $\alpha$        $\alpha := \arccos\left(\frac{U_{ft}}{U_{di0}}\right)$        $\alpha = 1.41$        $\alpha \cdot \frac{180}{\pi} = 80.793$

Überlappungswinkel  $\mu_\alpha$        $\mu_\alpha := \left[ \arccos\left[ \cos(\alpha) - (u_{xt} + LV) \right] - \alpha \right]$        $\mu_\alpha = 0.081$   
 $\mu_\alpha \cdot \frac{180}{\pi} = 4.648$

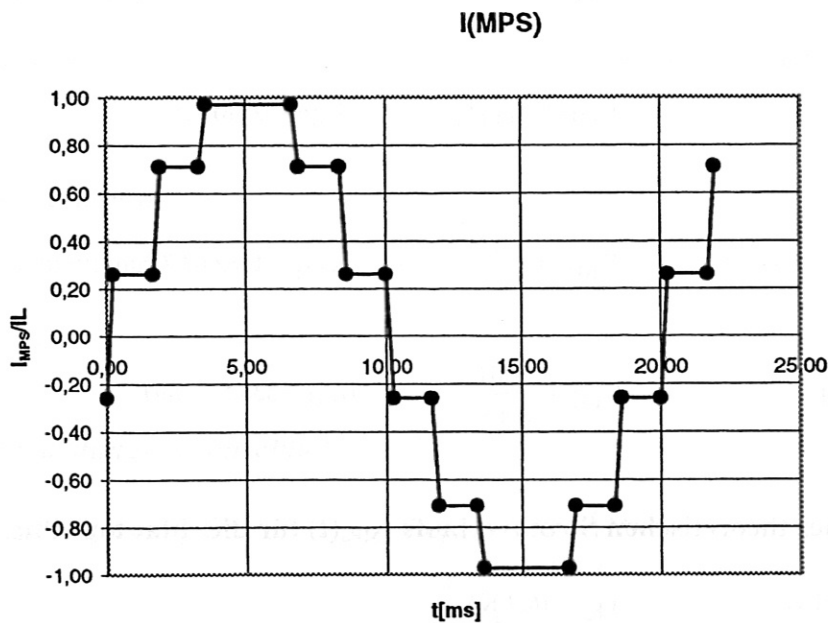
Überlappungszeit  $t_{\mu\alpha}$        $t_{\mu\alpha} := \frac{\mu_\alpha}{2 \cdot \pi \cdot f}$        $t_{\mu\alpha} = 0.258 \cdot \text{ms}$

*Strom auf der Primärseite des Gleichrichtertransformators*

Stromgrundschiwingung       $I_{1L} = \frac{P_{d0}}{\sqrt{3} U}$        $I_{1L} = 8.66 \cdot \text{A}$

Stromscheitelwert  $I_{1LS}$        $I_{1LS} := I_{1L} \cdot \sqrt{2}$        $I_{1LS} = 12.247 \cdot \text{A}$

Primärseitiger Strom  $I_L$        $I_L := \frac{I_{1L}}{0.96}$        $I_L = 9.021 \cdot \text{A}$



*Theoretischer Stromverlauf  $I_{MPS}(t)$  für  $I_f = 16 \text{ kA}$  ( $\alpha = 80.8^\circ$ ,  $\mu_\alpha = 4.6^\circ$ )*

Der theoretische Stromverlauf  $I_{MPS}(t)$  wurde zunächst mit einer PSpice 'PWL Stromquelle' simuliert. Die stückweise lineare Stromkurve wird hierbei durch Eingabe der Zeit/Strom Wertepaare für die Eckpunkte beschrieben. Die anschließende Fourierzerlegung lieferte die Amplituden, Frequenzen und Phasenlagen der Oberschwingungsströme wie sie für das MPS Model verwendet wurden.

### 5.53 Fourierzerlegung des theoretischen Stromverlaufs $I_{MPS}(t)$ , Amplituden und Phasenlagen der Oberschwingungsströme

Die folgenden Werte gelten für die unter 5.52 beschriebene Stromkurve mit einem Flat Top Strom von  $I_{ft} = 16$  kA. Der Nennstrom für das Achsenfeld von  $B_N = 3$  T beträgt jedoch  $I_{ftN} = 14.5$  kA wodurch sich der Aussteuerungswinkel geringfügig von  $\alpha = 80.6^\circ$  auf  $\alpha = 81.7^\circ$  erhöht. Der die Steilheit der der Stromkurve bestimmende Überlappungswinkel bleibt mit  $\mu_\alpha = 4.64^\circ$  nahezu unverändert.

$$\alpha := 80$$

$$\mu_\alpha := 4.64778$$

$I_1 := 12.17 \cdot A$	$f_1 := 50 \cdot Hz$	$\phi_1 := \frac{\mu_\alpha}{2} + \alpha$	$\phi_1 = 82.324$
$I_{11} := 1.073 \cdot A$	$f_{11} := 550 \cdot Hz$	$\phi_{11} := \frac{f_{11} \phi_1}{f_1}$	$\phi_{11} = 905.563$
$I_{13} := 0.896 \cdot A$	$f_{13} := 650 \cdot Hz$	$\phi_{13} := \frac{f_{13} \phi_1}{f_1}$	$\phi_{13} = 1.07 \cdot 10^3$
$I_{23} := 0.460 \cdot A$	$f_{23} := 1150 \cdot Hz$	$\phi_{23} := \frac{f_{23} \phi_1}{f_1}$	$\phi_{23} = 1.893 \cdot 10^3$
$I_{25} := 0.413 \cdot A$	$f_{25} := 1250 \cdot Hz$	$\phi_{25} := \frac{f_{25} \phi_1}{f_1}$	$\phi_{25} = 2.058 \cdot 10^3$
$I_{35} := 0.248 \cdot A$	$f_{35} := 1750 \cdot Hz$	$\phi_{35} := \frac{f_{35} \phi_1}{f_1}$	$\phi_{35} = 2.881 \cdot 10^3$
$I_{37} := 0.225 \cdot A$	$f_{37} := 1850 \cdot Hz$	$\phi_{37} := \frac{f_{37} \phi_1}{f_1}$	$\phi_{37} = 3.046 \cdot 10^3$
$I_{47} := 0.134 \cdot A$	$f_{47} := 2350 \cdot Hz$	$\phi_{47} := \frac{f_{47} \phi_1}{f_1}$	$\phi_{47} = 3.869 \cdot 10^3$
$I_{49} := 0.120 \cdot A$	$f_{49} := 2450 \cdot Hz$	$\phi_{49} := \frac{f_{49} \phi_1}{f_1}$	$\phi_{49} = 4.034 \cdot 10^3$

## 6. PSpice Netzwerkanalyse

### 6.1 Ergebnisse

Mit dem Netzwerkprogramm PSpice wurde zunächst der Betrieb von 6 PSM Einheiten (40 MVA) am vorgesehenen 110 kV Netz der HEVAG mit (Simulation 3.12) und ohne Saugkreise (Simulation 3.13) analysiert. Die entsprechenden Ersatzschaltungen sind in den Abbildungen 2 und 8 wiedergegeben. Das dort verwendete PSM Symbol repräsentiert dabei die Parallelschaltung von 6 Transformator-Gleichrichtereinheiten bestehend aus je 7 parallelen Stromquellen mit der gemeinsamen Streuinduktivität der Transformatoren (Abb. 23). Der durch das PSM Model erzwungene Strom  $I_{PSM}$  wird also durch die Überlagerung der Grundschwingung mit den Stromharmonischen 11, 13, 23, 25, 35 und 37 gebildet.

In einer weiteren Analyse (Simulation 4.2) wurde der zusätzliche Betrieb von 5 MPS Anlagen (1.5 MVA) entsprechend Abb. 19 simuliert. Das verwendete MPS Model beinhaltet dabei die Parallelschaltung von 5 Transformator-Gleichrichtereinheiten (Abb. 24). Im Strom  $I_{MPS}$  sind auch die 47. und die 49. Harmonische berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Analysen sind in Form von PSpice Plots im Anhang zusammengestellt und in Tabelle 1 aufgelistet. Die für die Spannungen verwendete Indizierung hat folgende Bedeutung:

- $U_a$  - Generatorspannung (auf 20 kV Ebene transformiert)
- $U_b$  - Spannung auf der 110 kV Seite des Umspanntransformators (auf 20 kV Ebene transformiert)
- $U_c$  - Spannung auf der 20 kV Seite des Umspanntransformators
- $U_{b1}$  - Grundschiwingung der Spannung  $U_b$

Die wiedergegebenen Plots zeigen in anschaulicher Weise sowohl das Ausmaß der Netzurückwirkungen (Abb. 3 - 7) als auch die glättende Wirkung der betrachteten Saugkreise (SK) (Abb. 9 - 13). Die Ströme in den Saugkreisen sowie die Spannungsverläufe an den Kondensatoren geben die Abbildungen 14 bis 18 wieder. Die Saugkreise würden mit den PSMs als alleiniger Last zu einer Überkompensation mit einem kapazitiven  $\cos \varphi = 0.945$  führen (Abb. 9).

Die zusätzliche Last durch die Magnetversorgung hat praktisch keinen Einfluß auf die Spannungsqualität (Abb. 20 - 22). Der Leistungsfaktor ändert sich nur unwesentlich in Richtung 'weniger Überkompensation' ( $\cos \varphi = 0.955$ , kapazitiv).

**Tabelle 1: Zusammenstellung der PSpice Plots**

Abbildung Nr.	Gegenstand	Bemerkungen
2	Ersatzschaltung: PSM ohne Saugkreise	
3	$I_{PSM}(t)$ , $U_a(t)$ , / FFT: $I_{PSM}(t)$	Stromharmonische $I_{PSM}$
4	$I_{PSM}(t)$ , $U_a(t) / U_a(t)$ $U_b(t)$ $U_c(t)$	Phasenverschiebung, $I_{PSM}(t) - U_a(t)$
5	FFT: $U_b(t)$ / FFT: $U_c(t)$	Spannungsharmonische, 110 kV, 20 kV
6	$U_{b1}(t)$ , $U_b(t) / U_{b1}(t) - U_b(t)$	Augenblicksabweichung $\Delta U_{max}$ , 110 kV
7	$U_{c1}(t)$ , $U_c(t) / U_{c1}(t) - U_c(t)$	Augenblicksabweichung $\Delta U_{max}$ , 20 kV
8	Ersatzschaltung: PSM + SK	
9	$U_c(t)$ , $I_{Netz}(t)$ , $I_{PSM}(t) / U_c(t)$ , $I_{Netz}(t)$	Phasenverschiebung, PSM+SK
10	$U_a(t)$ $U_b(t)$ $U_c(t)$ / FFT: $I_{Netz}(t)$	Stromharmonische, PSM+SK
11	FFT: $U_b(t)$ / FFT: $U_c(t)$	Spannungsharmonische, PSM+SK
12	$U_{b1}(t)$ , $U_b(t) / U_{b1}(t) - U_b(t)$	$\Delta U_{max}$ , 110 kV, PSM+SK
13	$U_{c1}(t)$ , $U_c(t) / U_{c1}(t) - U_c(t)$	$\Delta U_{max}$ , 20 kV, PSM+SK
14	$I_5(t)$ , $U_5(t)$ , $U_c(t) / I_5(t)$ , $I_{5-eff}$	Saugkreis 5
15	$I_7(t)$ , $U_7(t)$ , $U_c(t) / I_7(t)$ , $I_{7-eff}$	Saugkreis 7
16	$I_{11}(t)$ , $U_{11}(t)$ , $U_c(t) / I_{11}(t)$ , $I_{11-eff}$	Saugkreis 11
17	$I_{13}(t)$ , $U_{13}(t)$ , $U_c(t) / I_{13}(t)$ , $I_{13-eff}$	Saugkreis 13
18	$I_{23}(t)$ , $U_{23}(t)$ , $U_c(t) / I_{23}(t)$ , $I_{23-eff}$	Saugkreis 23
19	Ersatzschaltung: PSM + MPS + SK	
20	$U_a(t)$ , $U_b(t)$ , $U_c(t) / I_{Netz}(t)$ , $I_{PSM}(t)$ , $I_{MPS}(t)$	Ströme, PSM+MPS+SK
21	$U_c(t)$ , $I_{Netz}(t)$ , $\cos \varphi / U_{c1}(t) - U_c(t)$	$\Delta U_{max}$ , PSM+MPS+SK
22	$I_{MPS}(t)$ / FFT: $I_{MPS}(t)$	Stromharmonische, PSM+MPS+SK
23	PSM- Model	6 Einheiten, 40 MVA
24	MPS- Model	5 Einheiten, 1.5 MVA

## 6.2 Auswertung

Die für die Qualität der Netzspannung ermittelten Kenngrößen sind bezogene Größen und wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} \text{Grundschwingungsgehalt} & \quad g_U = U_{1\text{-eff}}/U_{\text{eff}} \quad (\text{Grundschwingung/ Wechselgröße}) \\ \text{Effektivwertabweichung} & \quad \Delta U_{\text{eff}} = (U_{1\text{-eff}} - U_{\text{eff}})/U_{1\text{-eff}} \\ \text{Max. rel. Augenblicksabweichung} & \quad \Delta U_{\text{max,rel}} = (U_1 - U)_{\text{max}}/U_{1\text{Scheitel}} \end{aligned}$$

Tabelle 2 zeigt die Kenngrößen für die 110 kV- ( $U_b$ ) bzw. 20 kV Ebene ( $U_c$ ) mit und ohne Saugkeiswirkung (SK).

**Tabelle 2: Spannungsqualität, Kenngrößen**

Kenngröße	$U_b$ ohne SK	$U_b$ mit SK	$U_c$ ohne SK	$U_c$ mit SK
Grundschwingungsgehalt	99.9 %	100 %	99.5 %	100 %
Effektivwertabweichung	-0.06 %	0.08 %	-0.45 %	0.03 %
Max. Augenblicksabweichung	13.4 %	0.4 %	31.7 %	0.8 %

Nach VDE 0160 ist ein Grundschwingungsgehalt von  $g_U > 99.5 \%$  gefordert und eine maximale, relative Augenblicksabweichung  $< 20 \%$  zulässig. Die zulässige Augenblicksabweichung ist am 20 kV Anschlußpunkt (ohne SK) überschritten.

Eine weitere Kenngröße für die Spannungsqualität ist der relative Anteil der auf die Grundschwingung bezogenen Spannungsharmonischen (Tabelle 3).

**Tabelle 3: Spannungsharmonische, bezogen auf die Grundschwingung  $U_v/U_1$**

$v$	$U_b$ ohne SK	$U_b$ mit SK	$U_c$ ohne SK	$U_c$ mit SK
11	3.02 %	0.10 %	6.87 %	0.23 %
13	2.40 %	0.04 %	5.47 %	0.09 %
23	1.17 %	0.04 %	2.65 %	0.07 %
25	0.97 %	0.03 %	2.21 %	0.07 %
35	0.69 %	0.04 %	1.56 %	0.08 %
37	0.66 %	0.03 %	1.51 %	0.08 %

Der gemäß VDE 0160 für die 11. und die 13. Spannungsharmonische zulässige Grenzwert von 5 % ist auf der 20 kV Ebene (ohne SK) überschritten.

In Tabelle 4 sind die Effektivwerte des durch die Saugkreise fließenden Ströme  $I_{SK}$  und der an den Kondensatoren anliegenden Spannungen  $U_K$ , sowie die daraus resultierenden Kondensatorblindleistungen  $Q_K$  zusammengefaßt.

**Tabelle 4: Strom, Spannung und Blindleistungsaufnahme der Saugkreiskondensatoren**

<i>Saugkreis Nr.</i>	<i>I<sub>SK</sub>/A</i>	<i>U<sub>K</sub>/kV</i>	<i>Q<sub>K</sub>/MVar</i>
5	75.35	11.59	2.62
7	73.84	11.59	2.57
11	161.80	11.69	5.67
13	150.25	11.65	5.25
23	145.46	11.59	5.06

## 7. Zusammenfassung

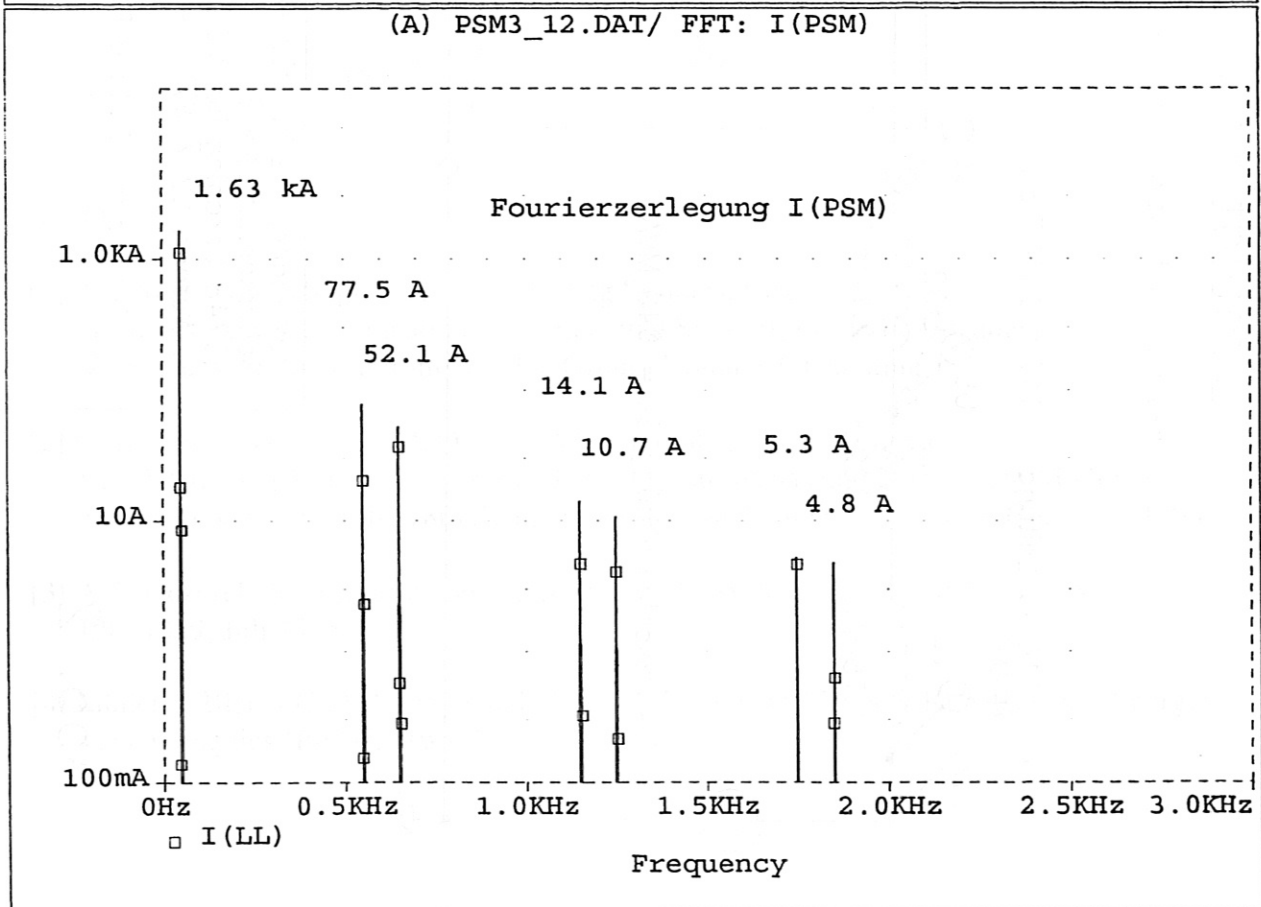
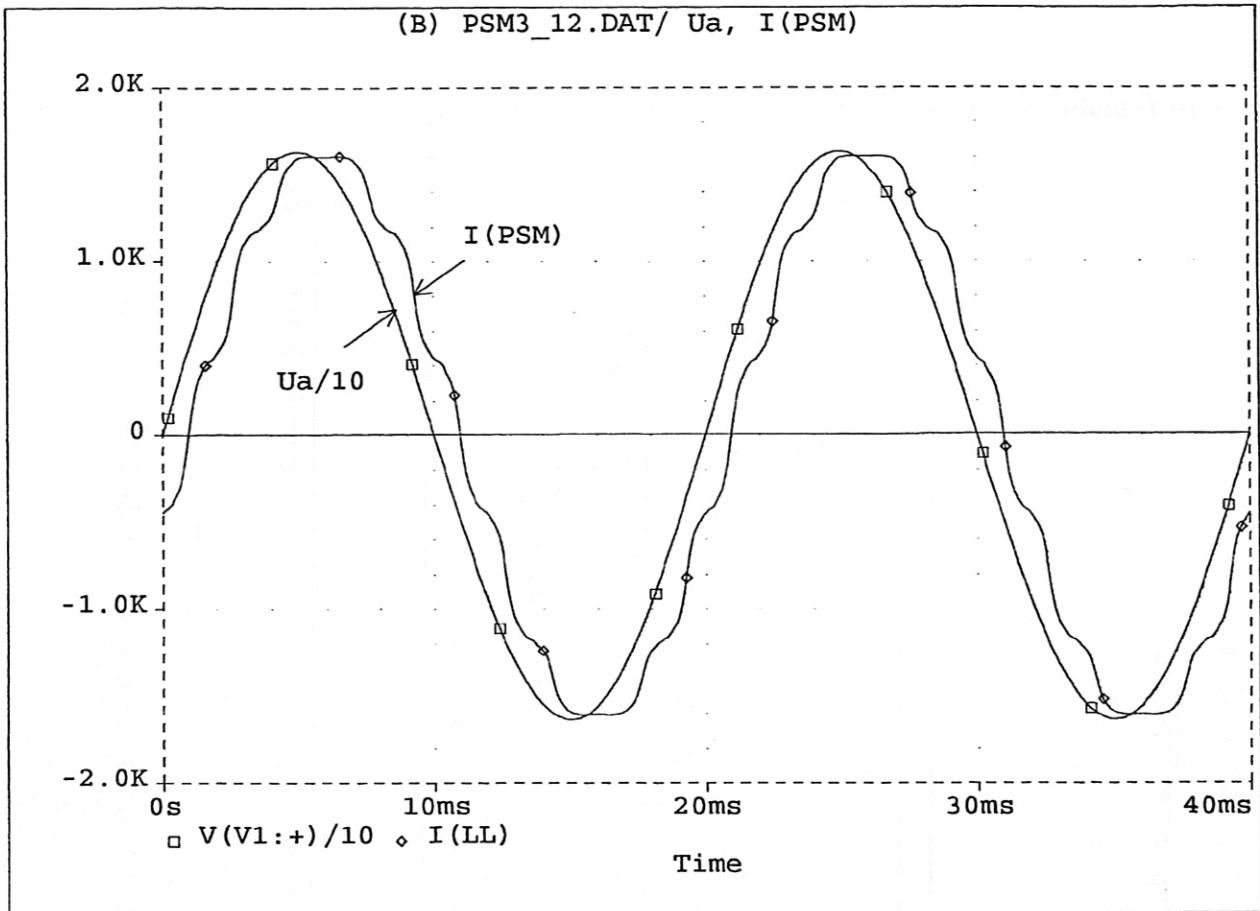
Der Betrieb der 40 MVA PSM- Stromversorgungen für die diversen W7X- Plasmaheizapparaturen führt nach VDE 0160 insbesondere auf der 20 kV Anschlußebene zu unzulässig hohen Netzrückwirkungen. Dies gilt sowohl für den Oberschwingungsgehalt der 11. und der 13. Spannungsharmonischen als auch für die maximale Augenblicksabweichung. Der Einsatz der von Müller & Bleher vorgesehenen Saugkreise führt zu einer deutlichen Unterschreitung der nach VDE 0160 zulässigen Grenzwerte so daß zu erwarten ist, daß auch der Netzbetreiber HEVAG zufrieden sein wird. Die geringfügige Verschlechterung der Spannungsqualität durch den zusätzlichen Betrieb der Magnetversorgungen ist vernachlässigbar.

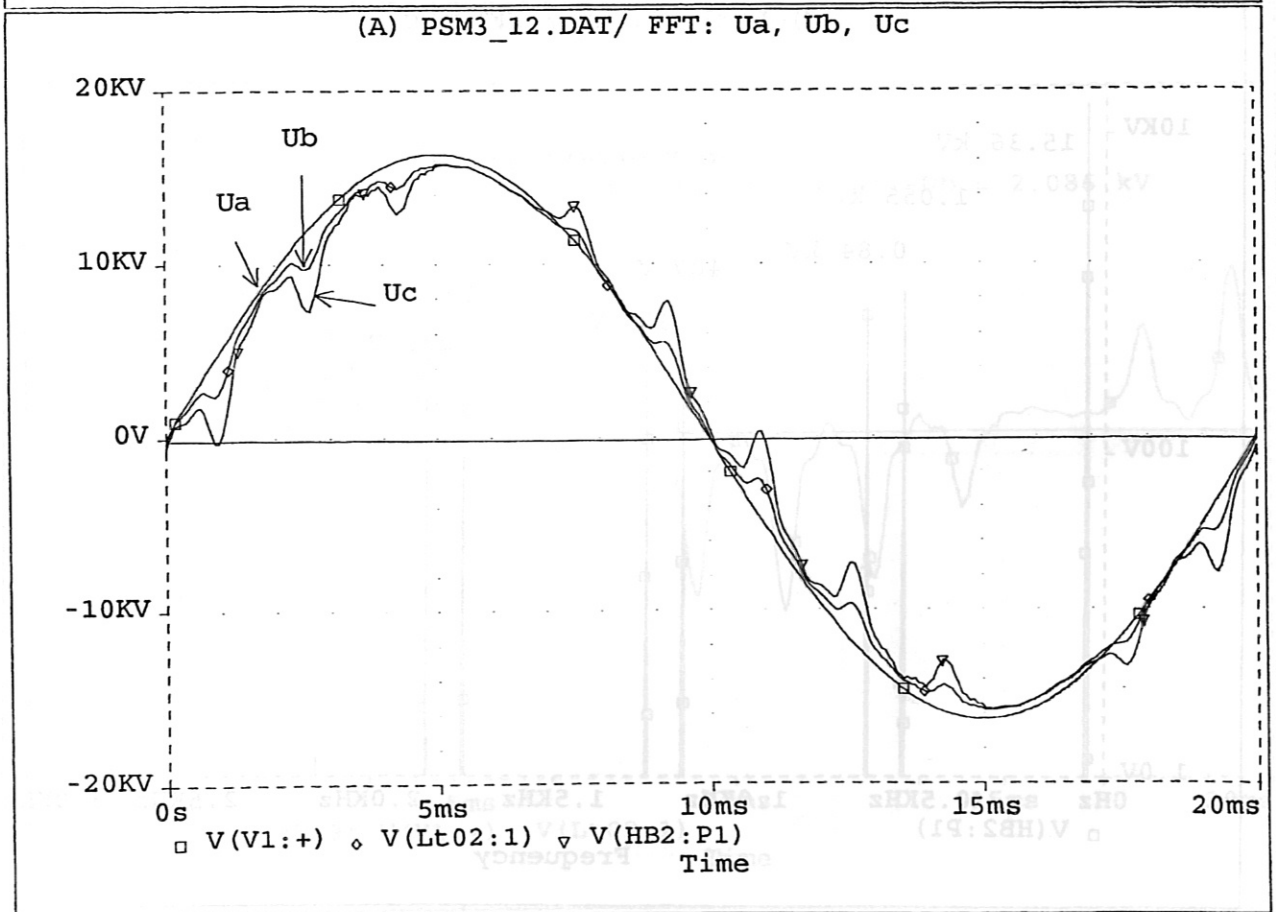
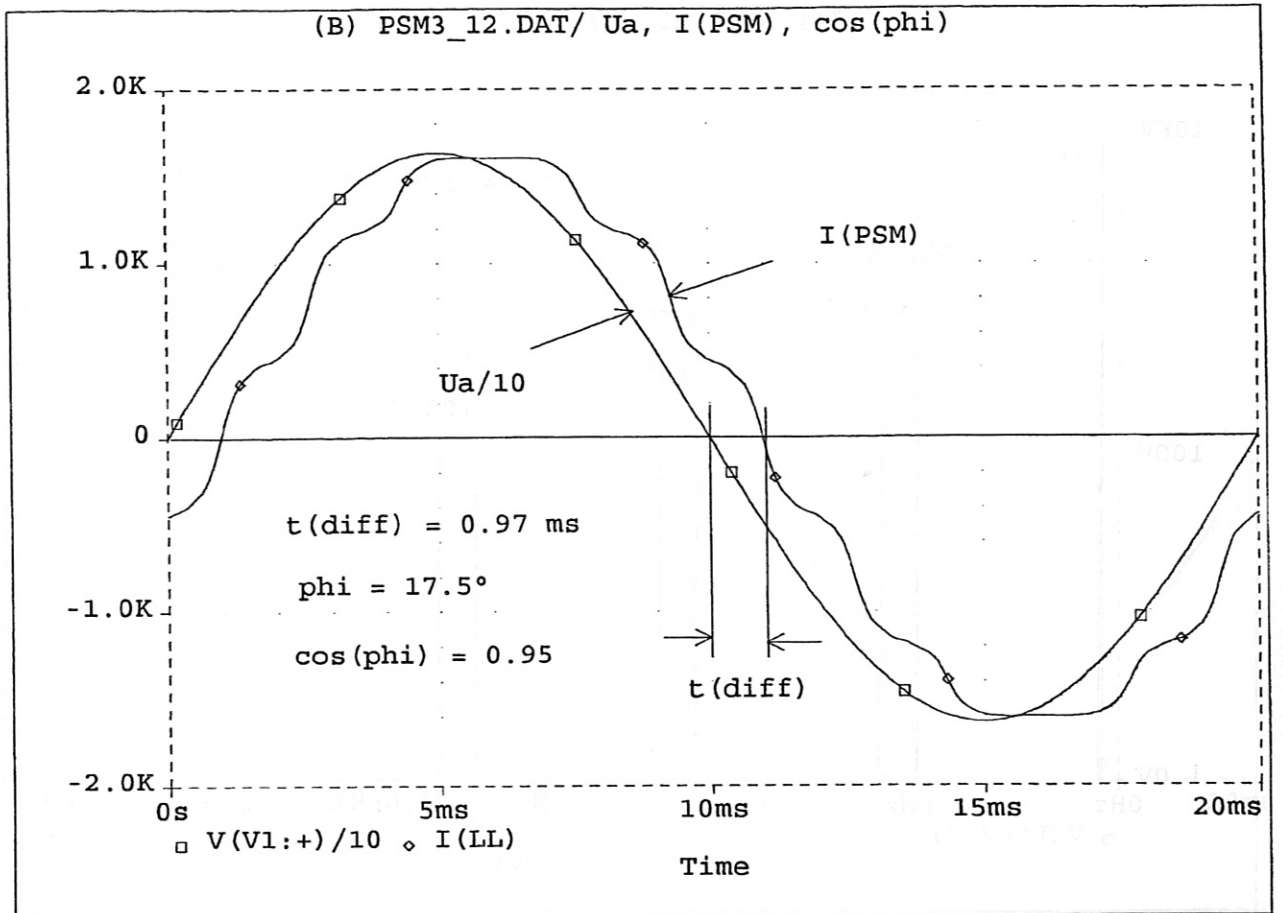
## Literatur

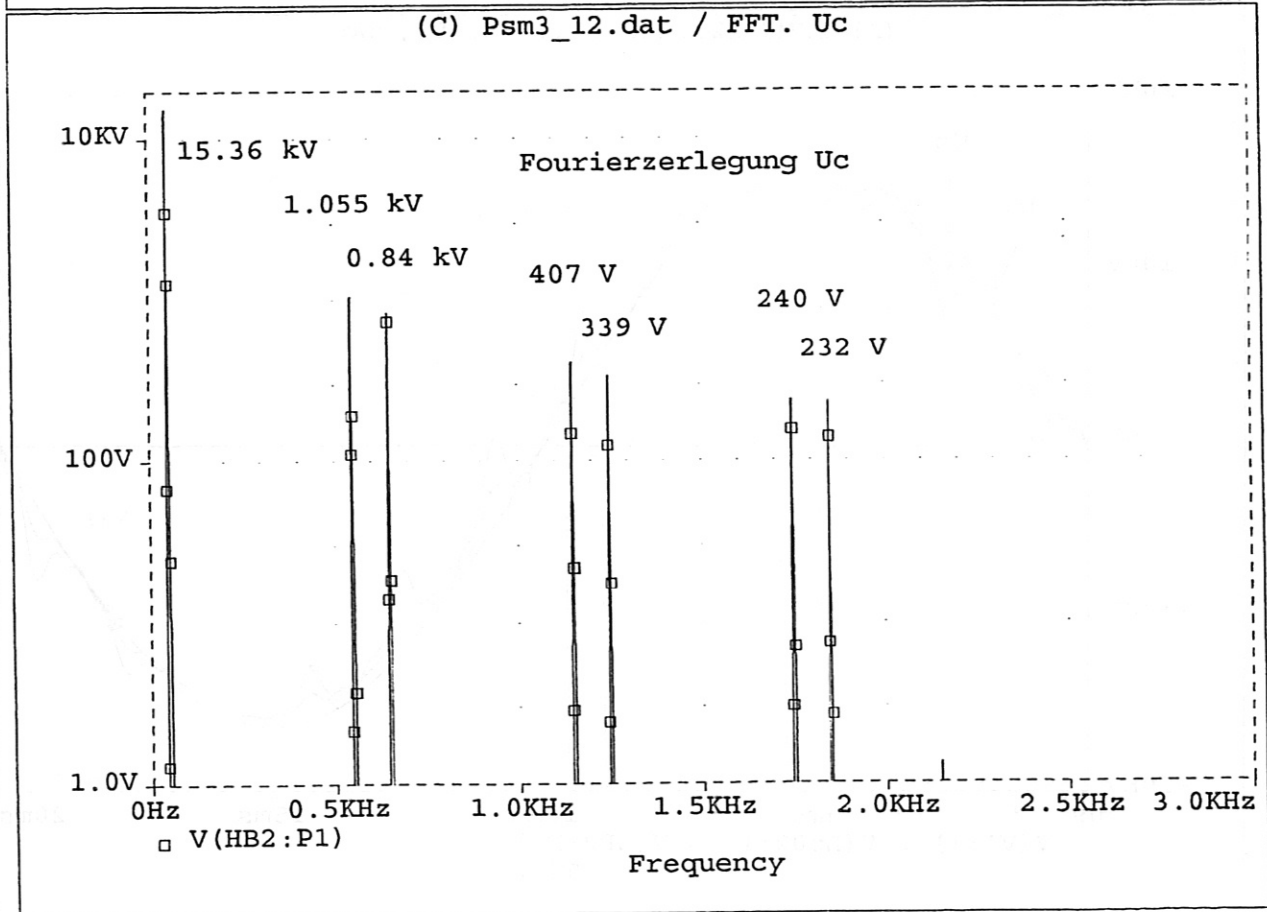
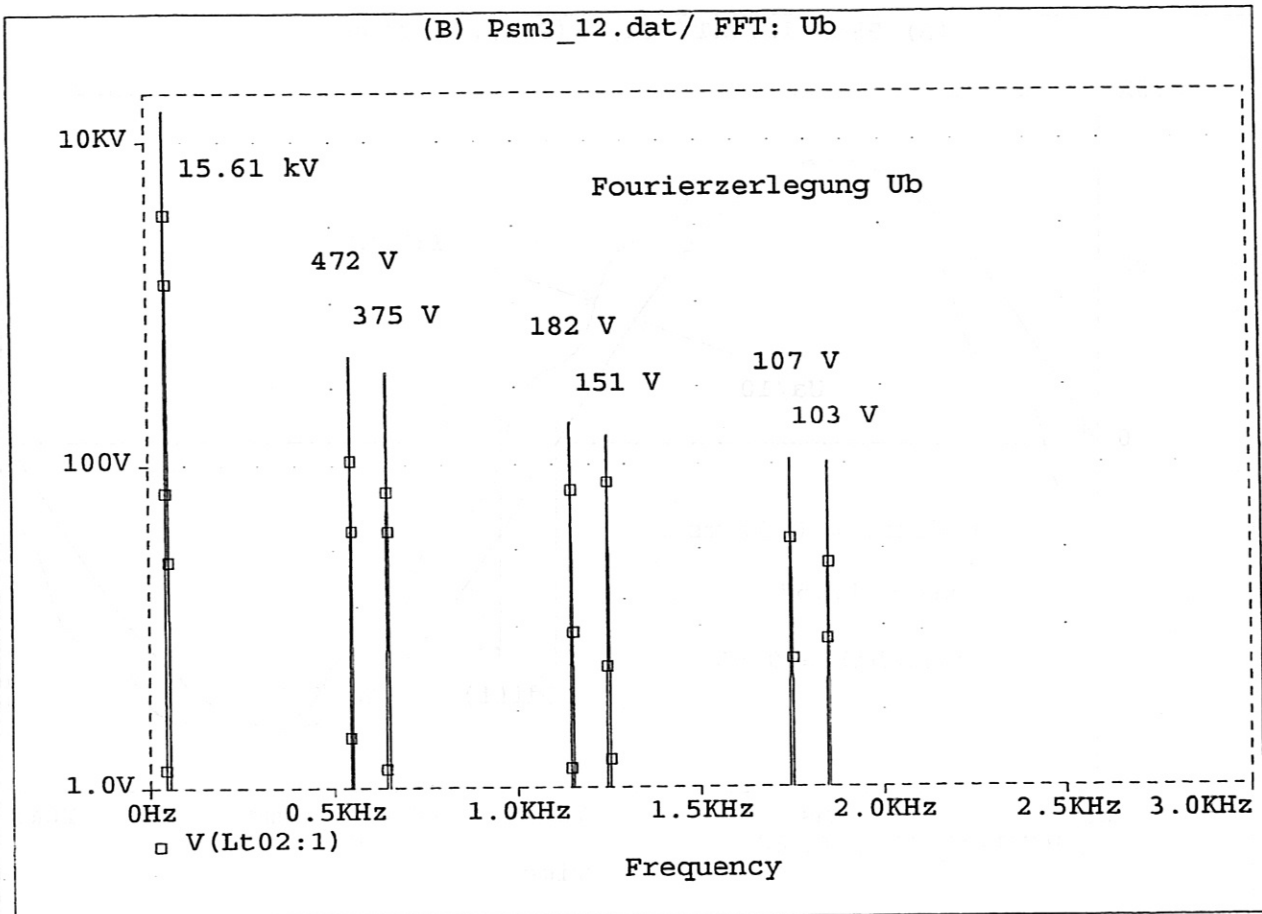
- [1] D. Dorst, Power Supplies for the Heating Systems, Cost Wendelstein 7-X, Application for Preferential Support, Phase II, Documents for the Assessment by the Euratom Ad-Hoc Group, Volume 3, Garching 1995
- [2] G. Besson, J. D. Bahud, M. Q. Tran, W. Schminke, N. Tomljenovic Regulated High Voltage Power Supply for Gyrotrons based on Pulse Step Modulator Technology, Proc. of the 18th Symp. on Fusion Technology, Karlsruhe, Germany, 1994
- [3] A. Wieczorek, Versorgung und Schutz der Spulensysteme am Wendelstein 7-X, IPP 2/329, Juli 1995
- [4] Müller & Bleher GmbH, Filderstadt, Untersuchung verschiedener Konzepte zur Energieversorgung des IPP Greifswald, 1996

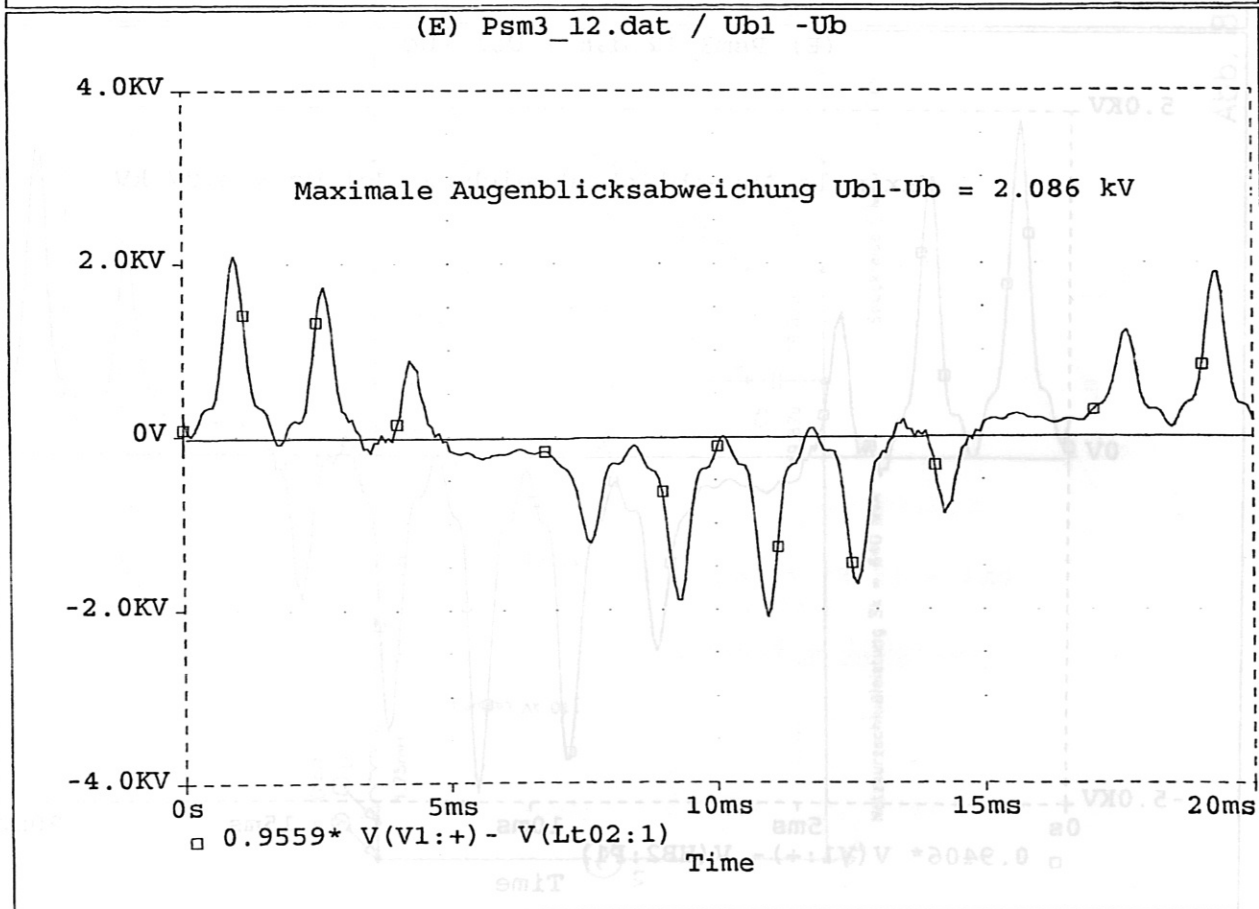
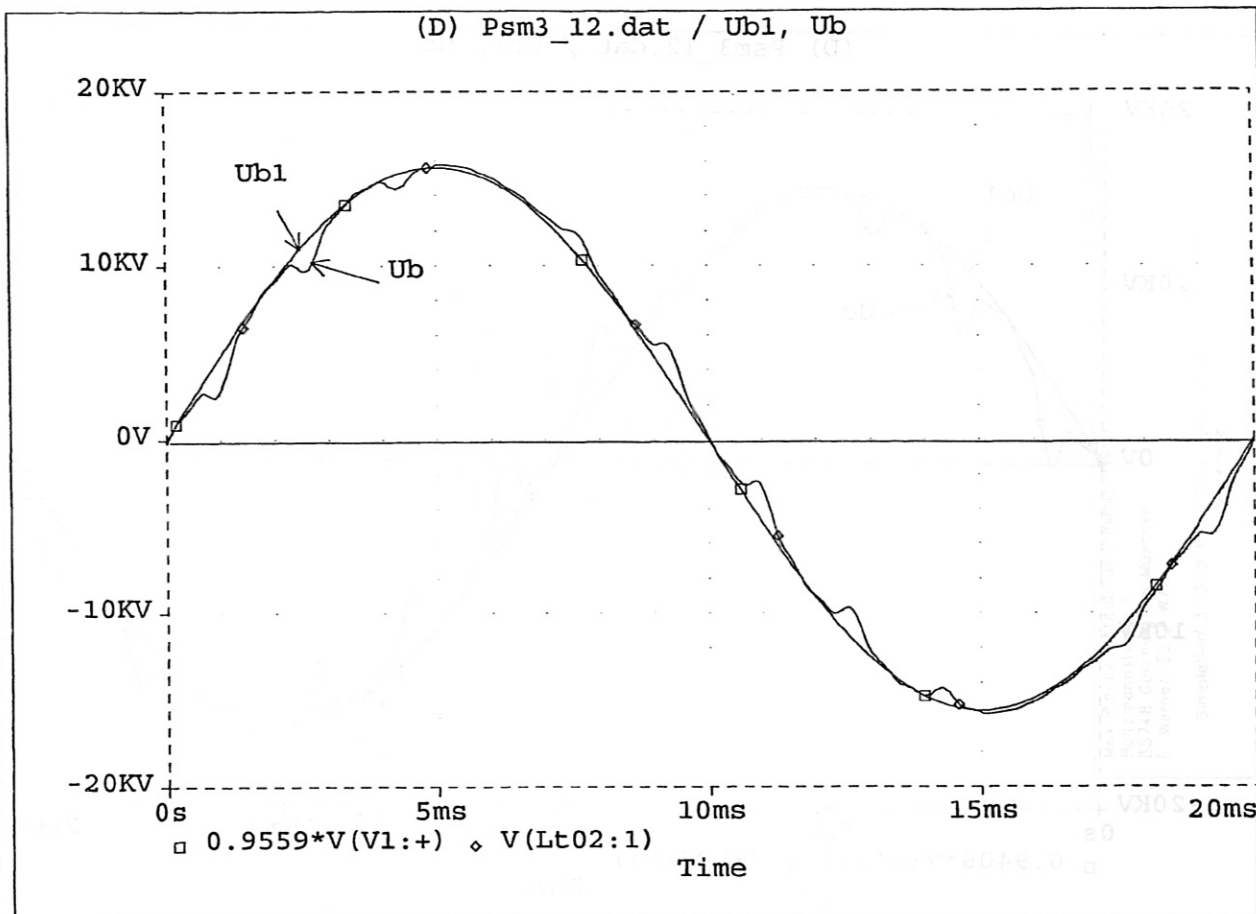


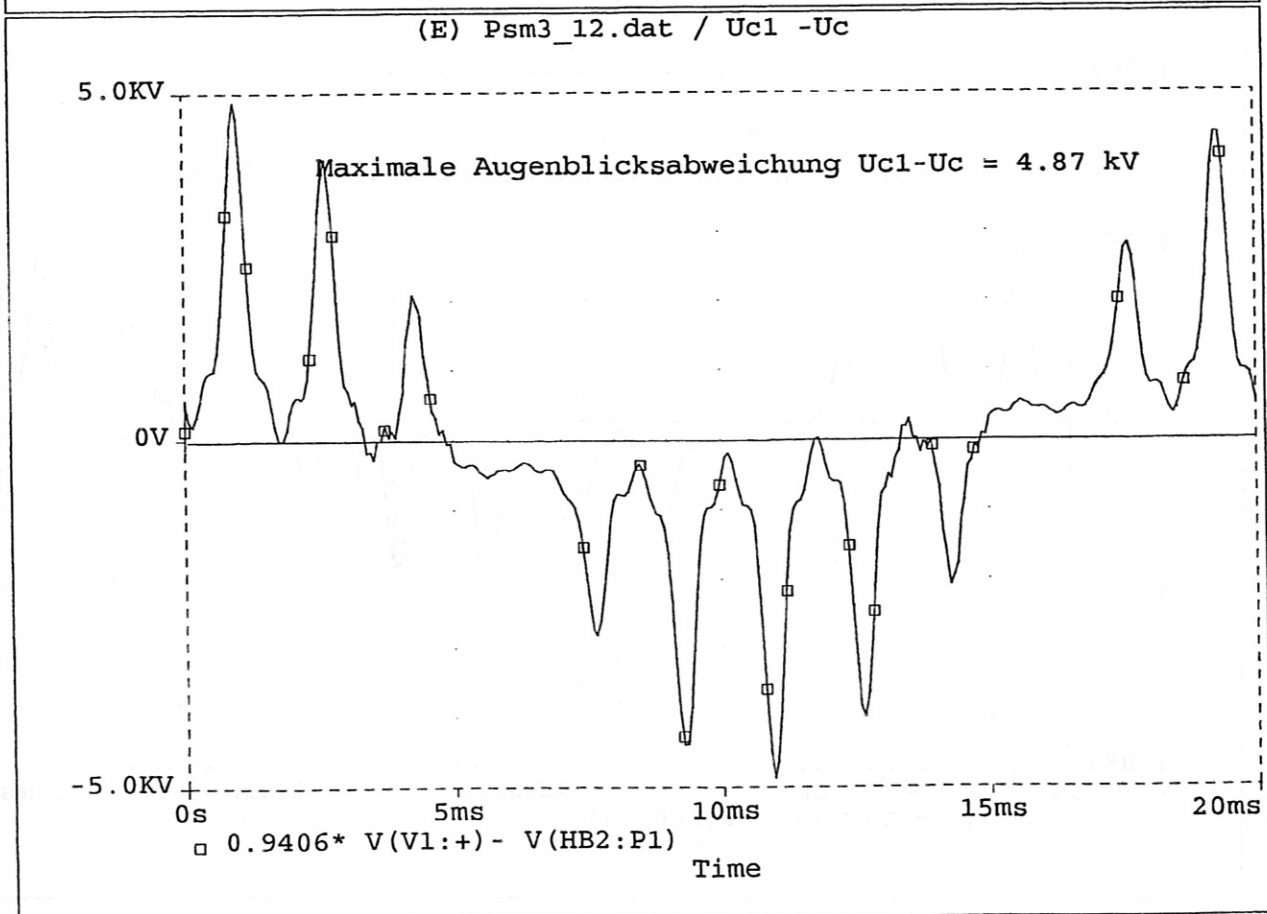
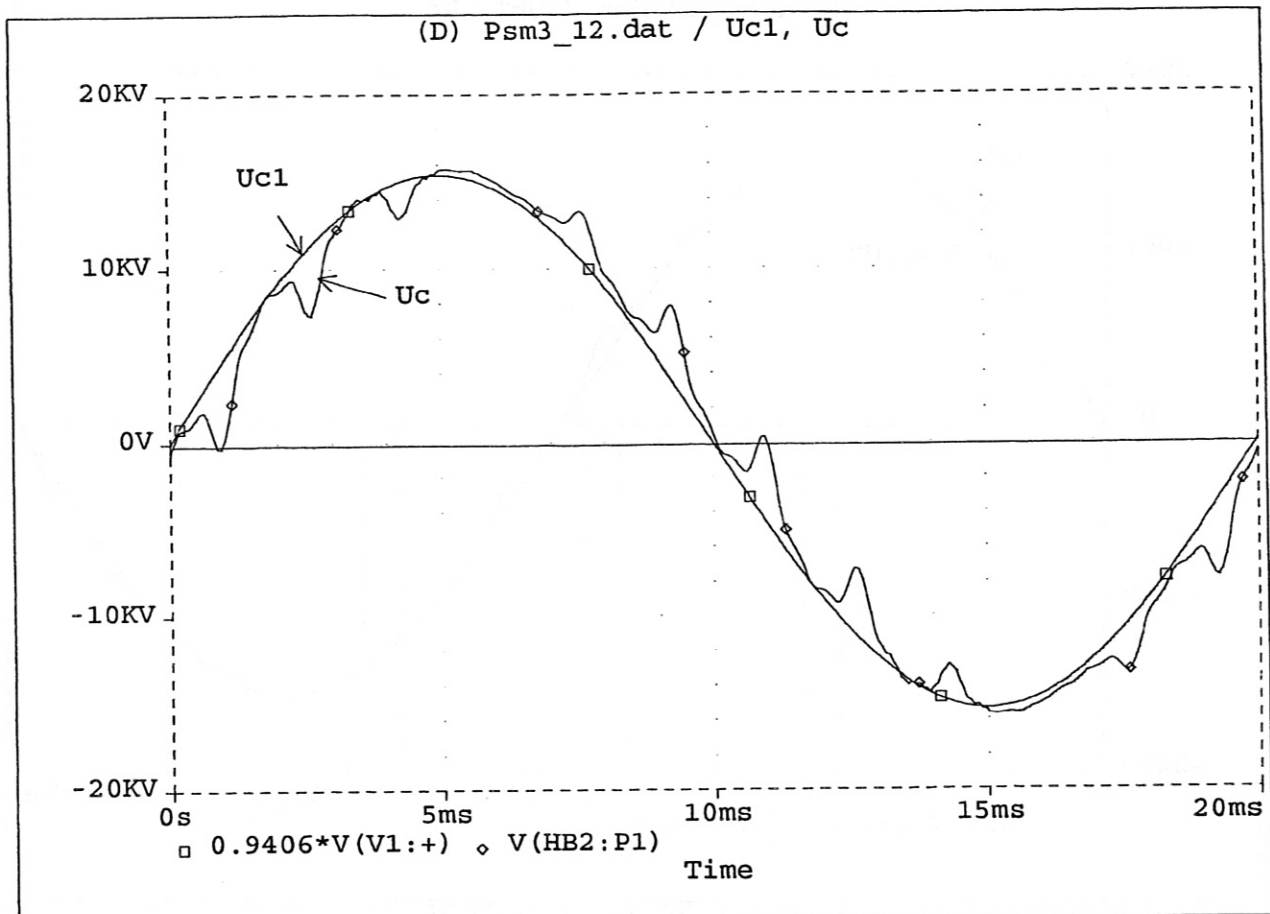






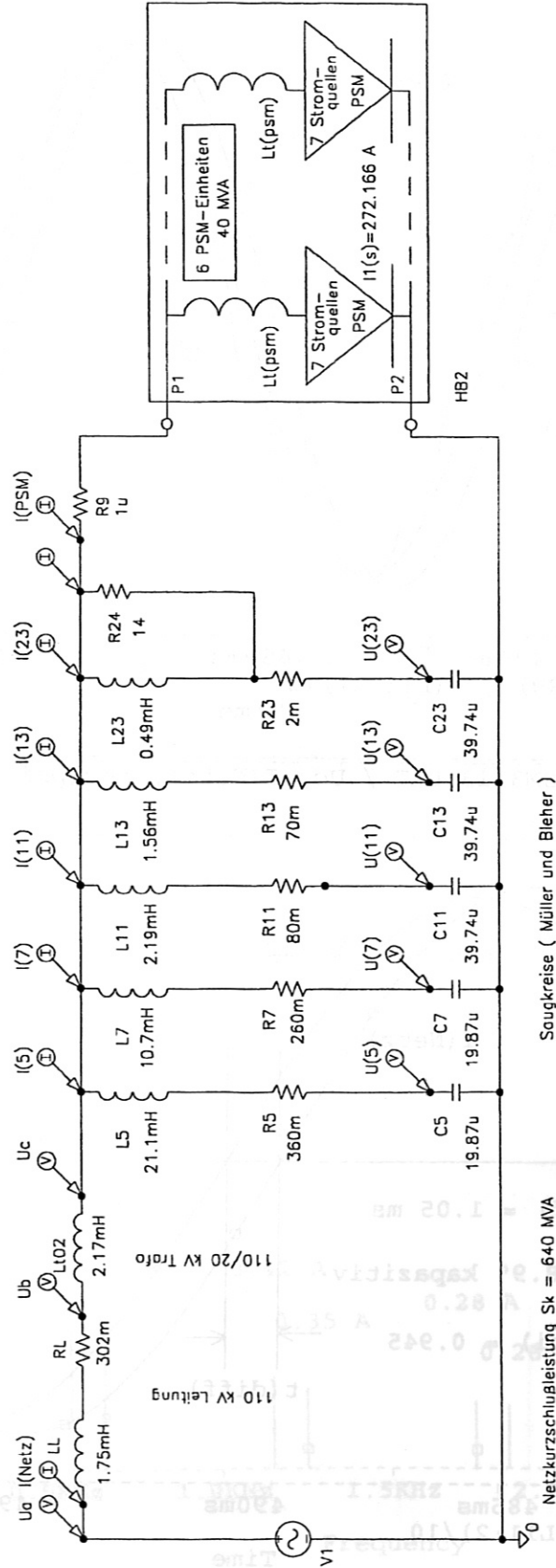






# Simulation 3.13: 6 PSM + SK

Bezugspunkt: Sekundärseite des Umspanntrafos

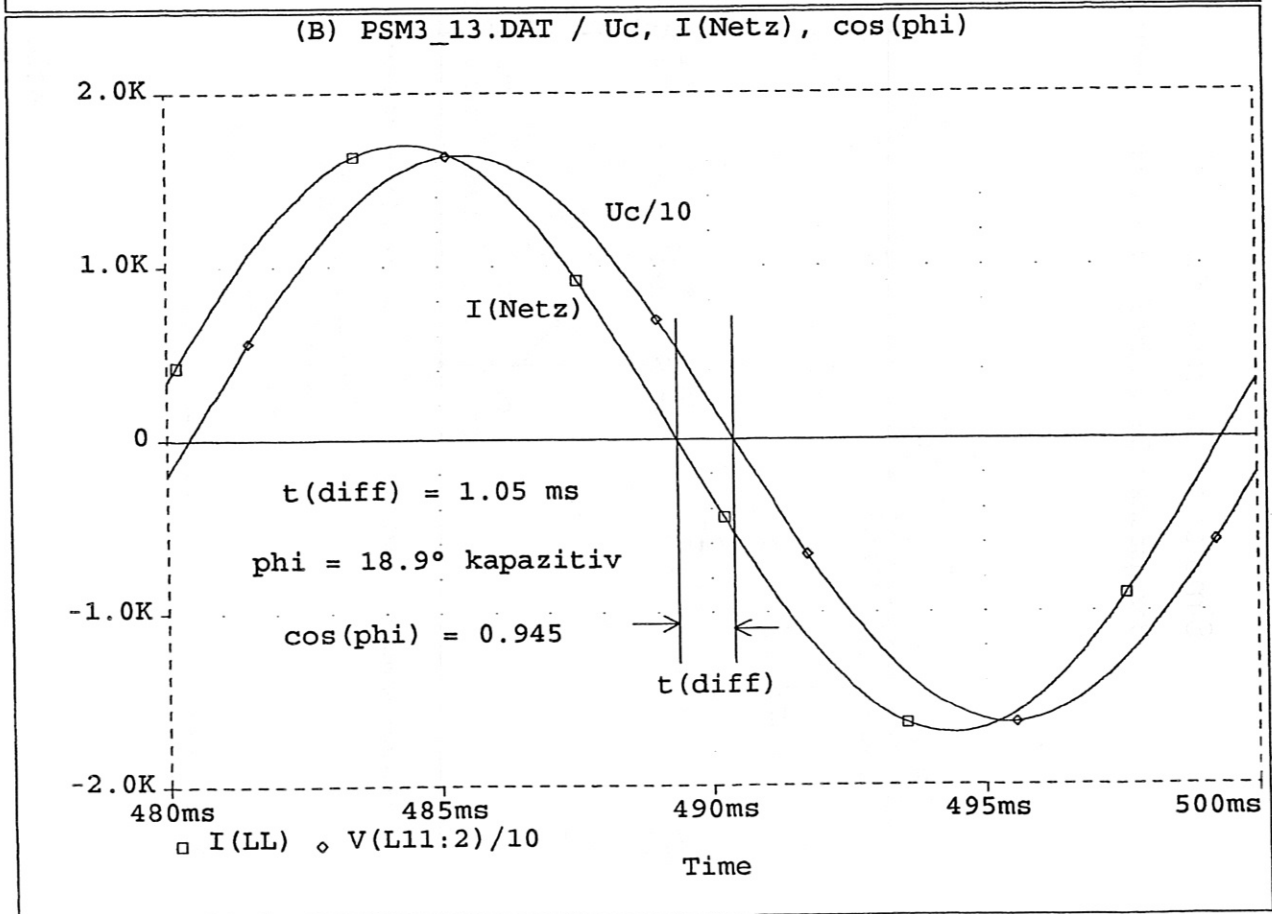
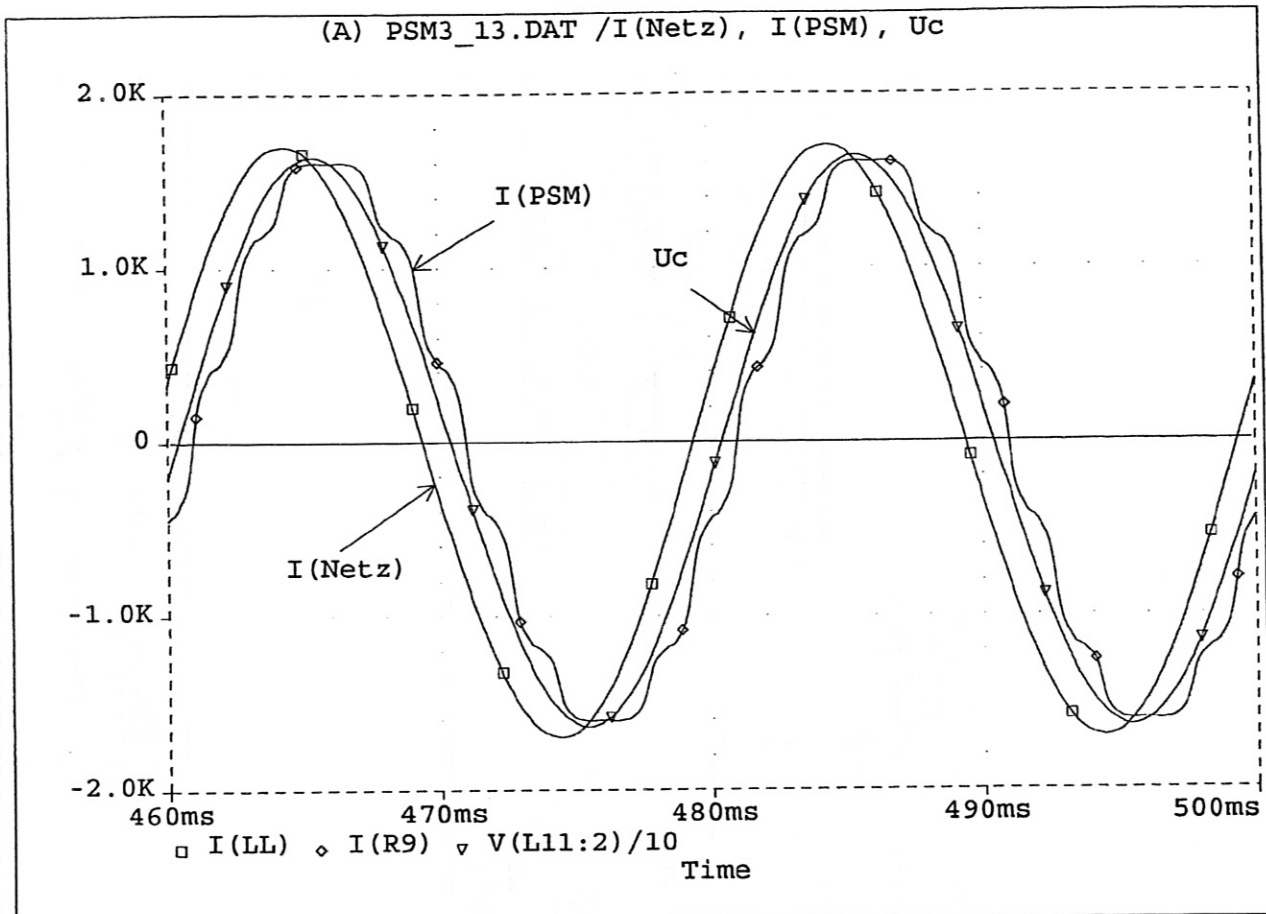


Netzkurzschlussleistung  $S_k = 640 \text{ MVA}$

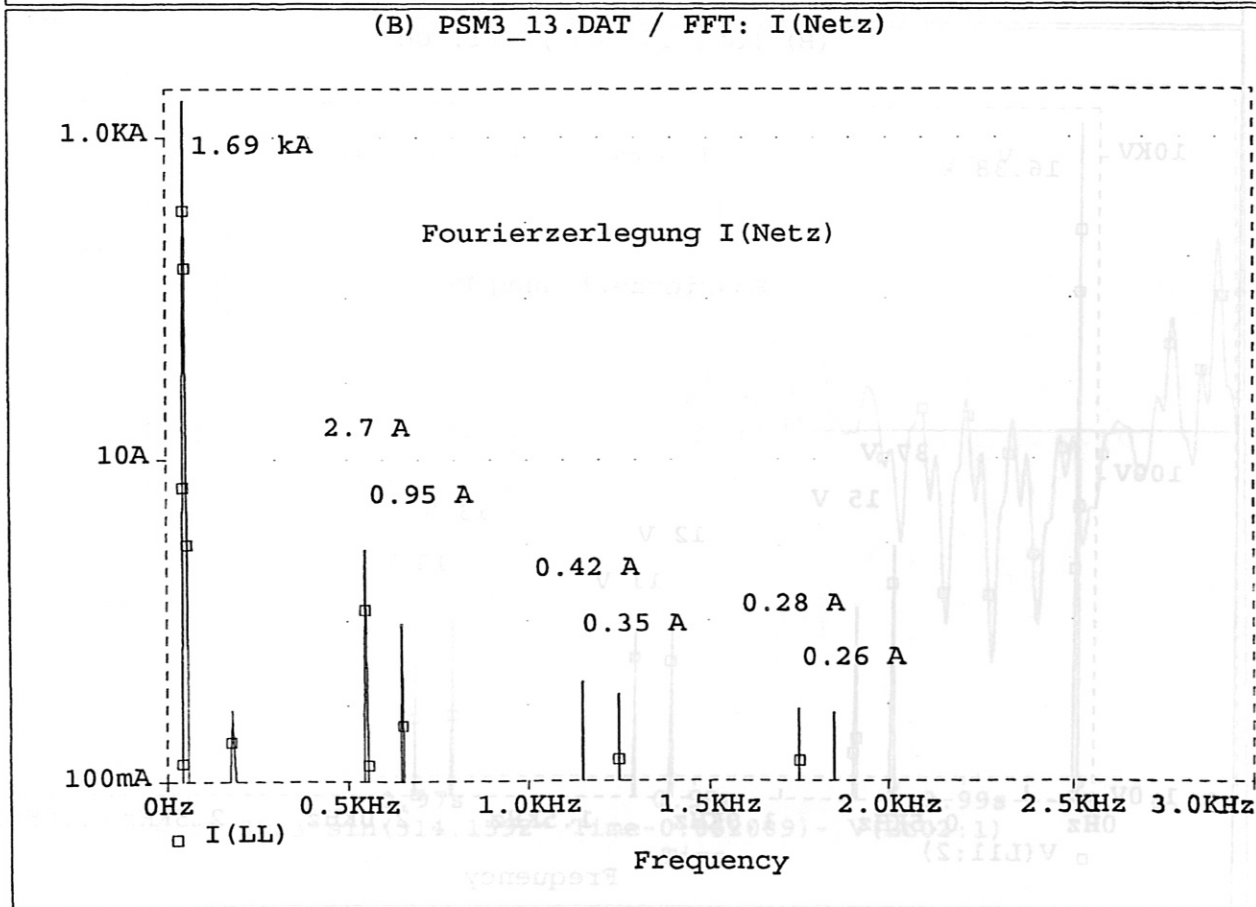
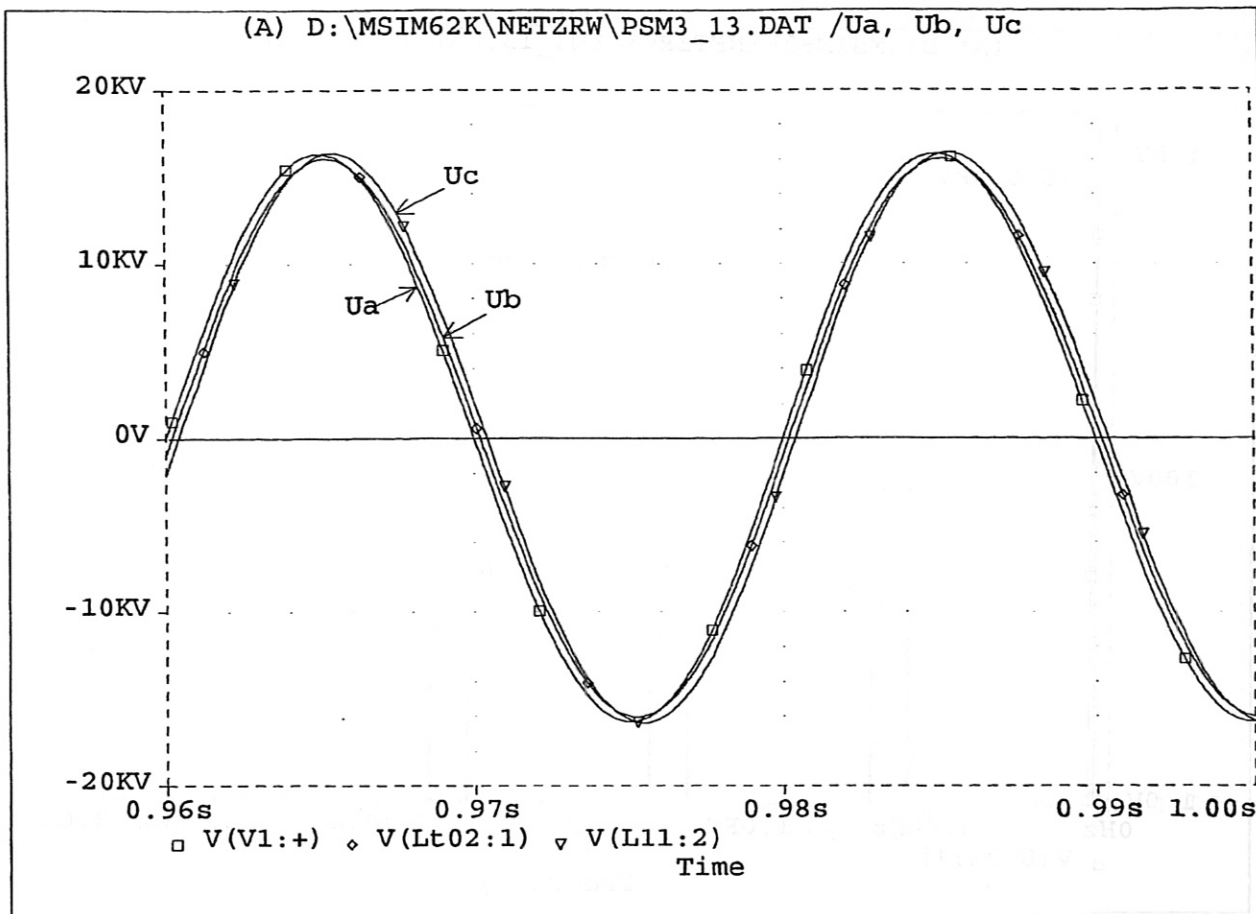
Saugkreise ( Müller und Bleher )

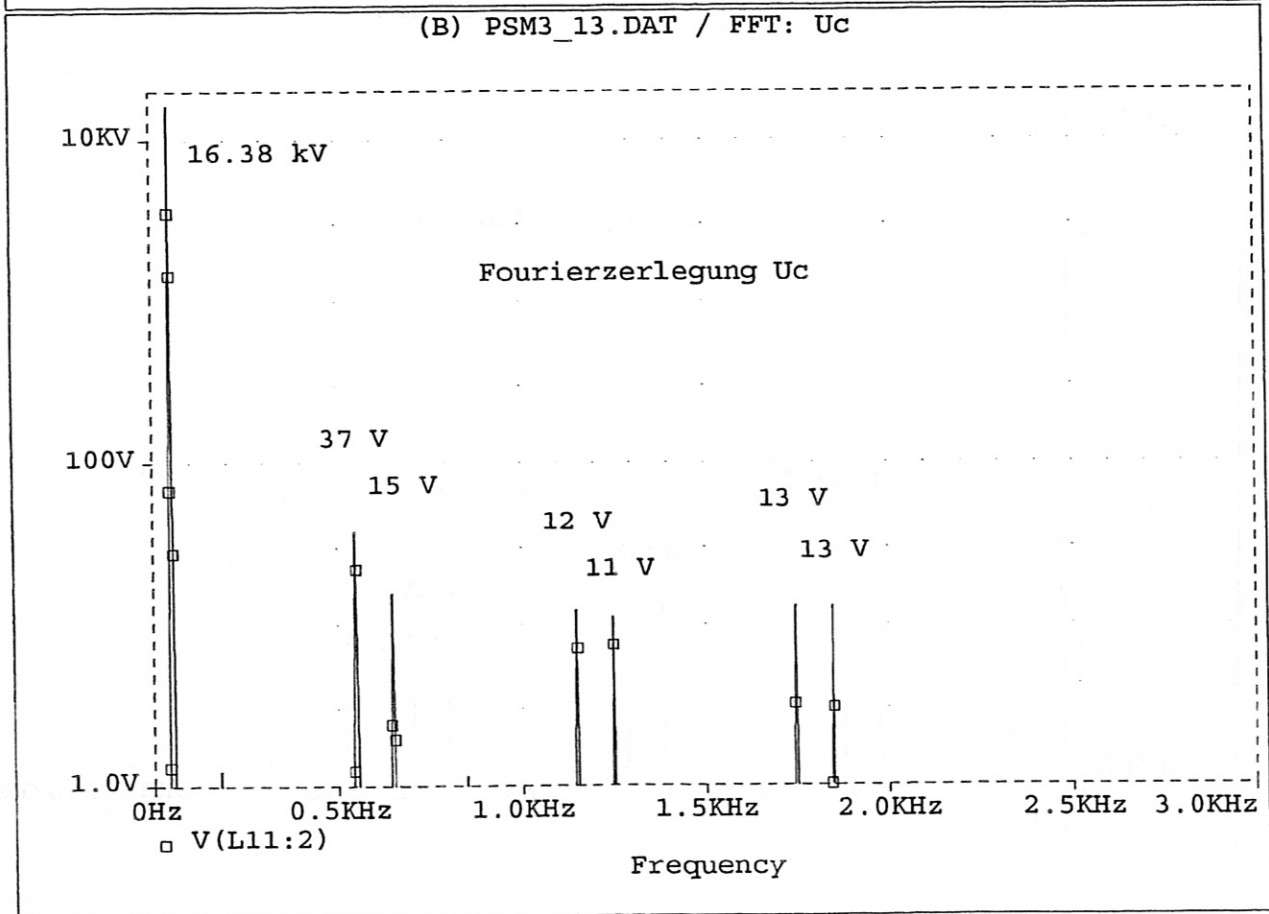
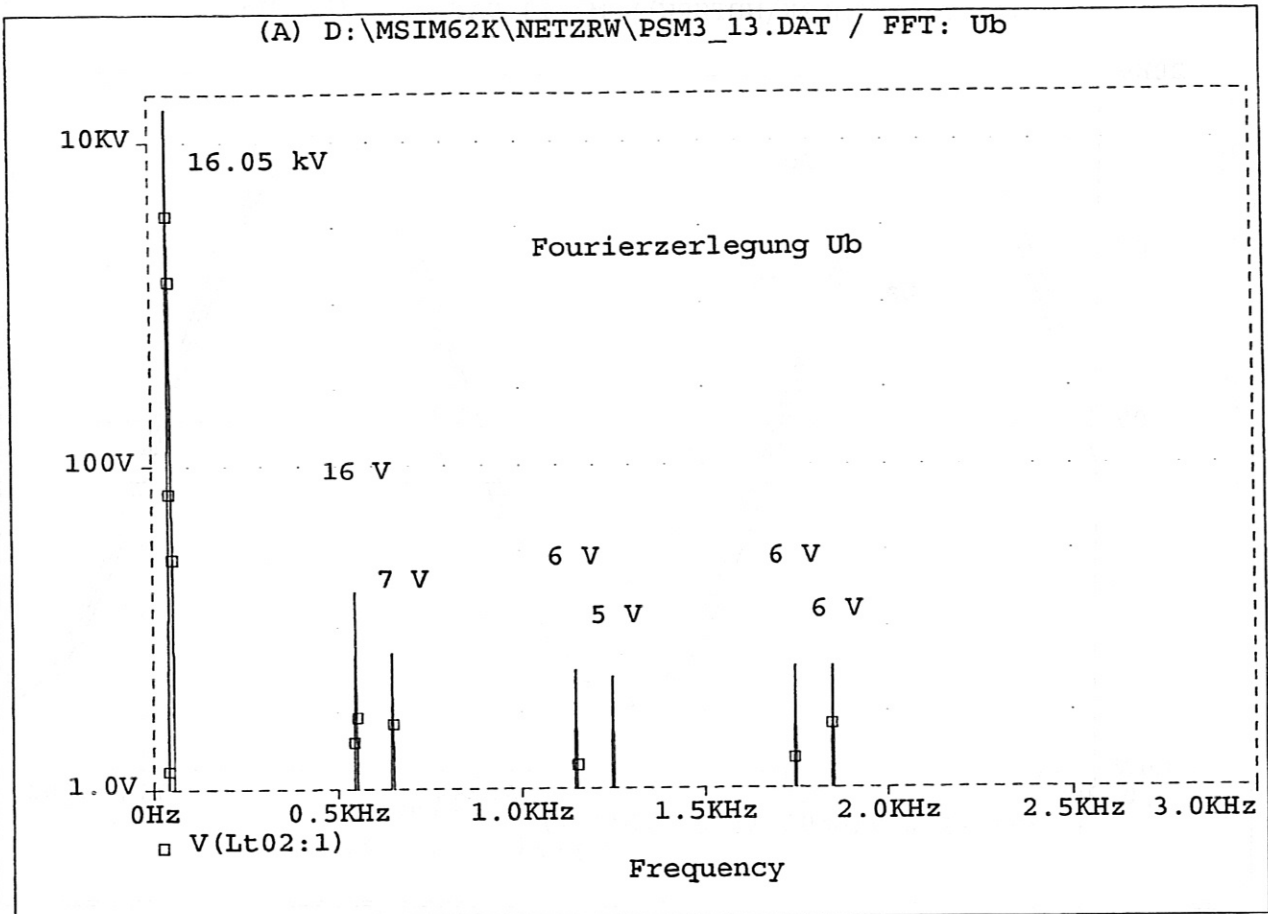
Max Planck Institut für Plasma Physik  
 Boltzmannstraße 2  
 85748 Garching bei München  
 F. Werner, E2 / W7X  
 Simulation 3.13: 6 PSM, 110 kV Leitung ( $S_k = 640 \text{ MVA}$ ), Trafo  
 Saugkreise  
 psm3\_13.sch A  
 Jan.. 97

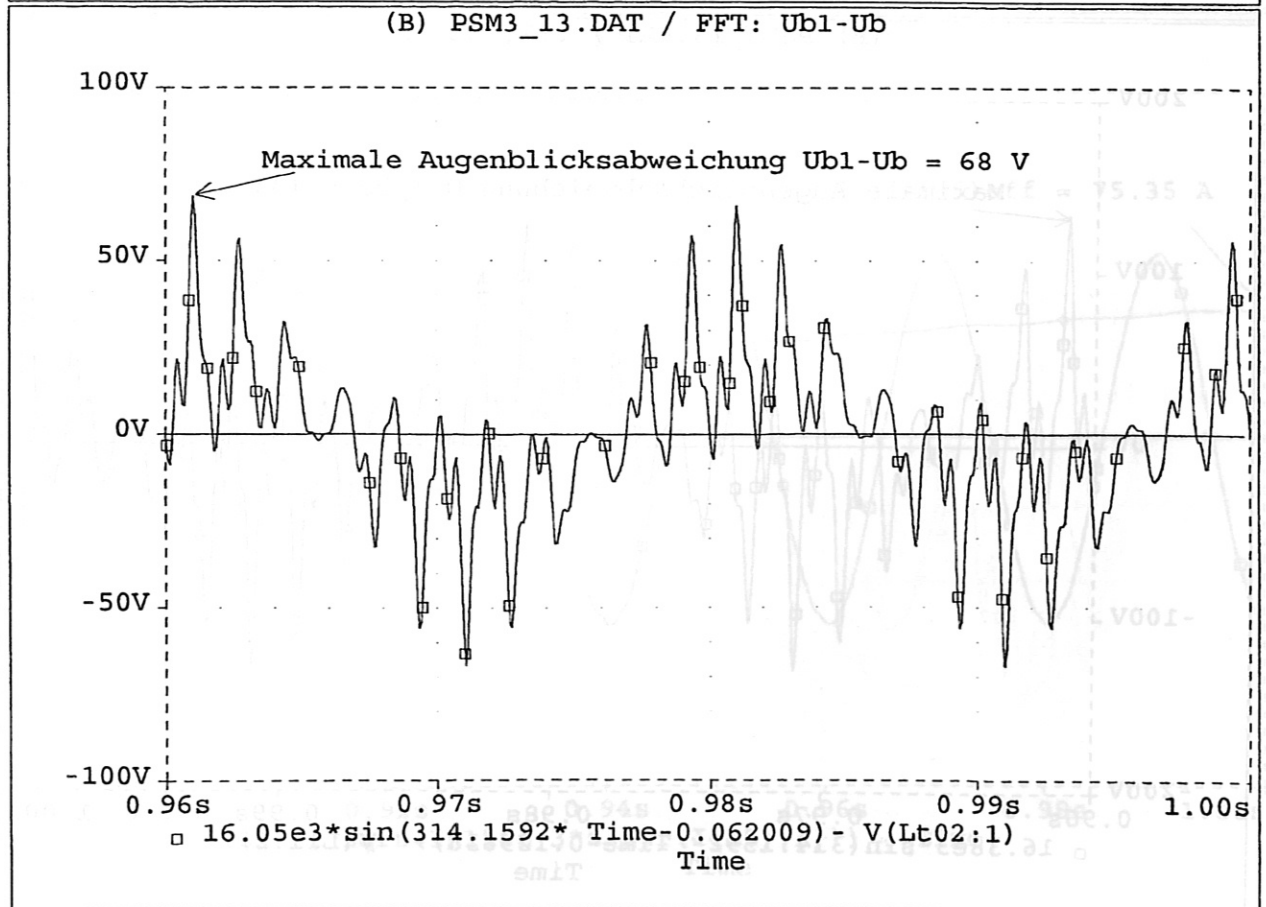
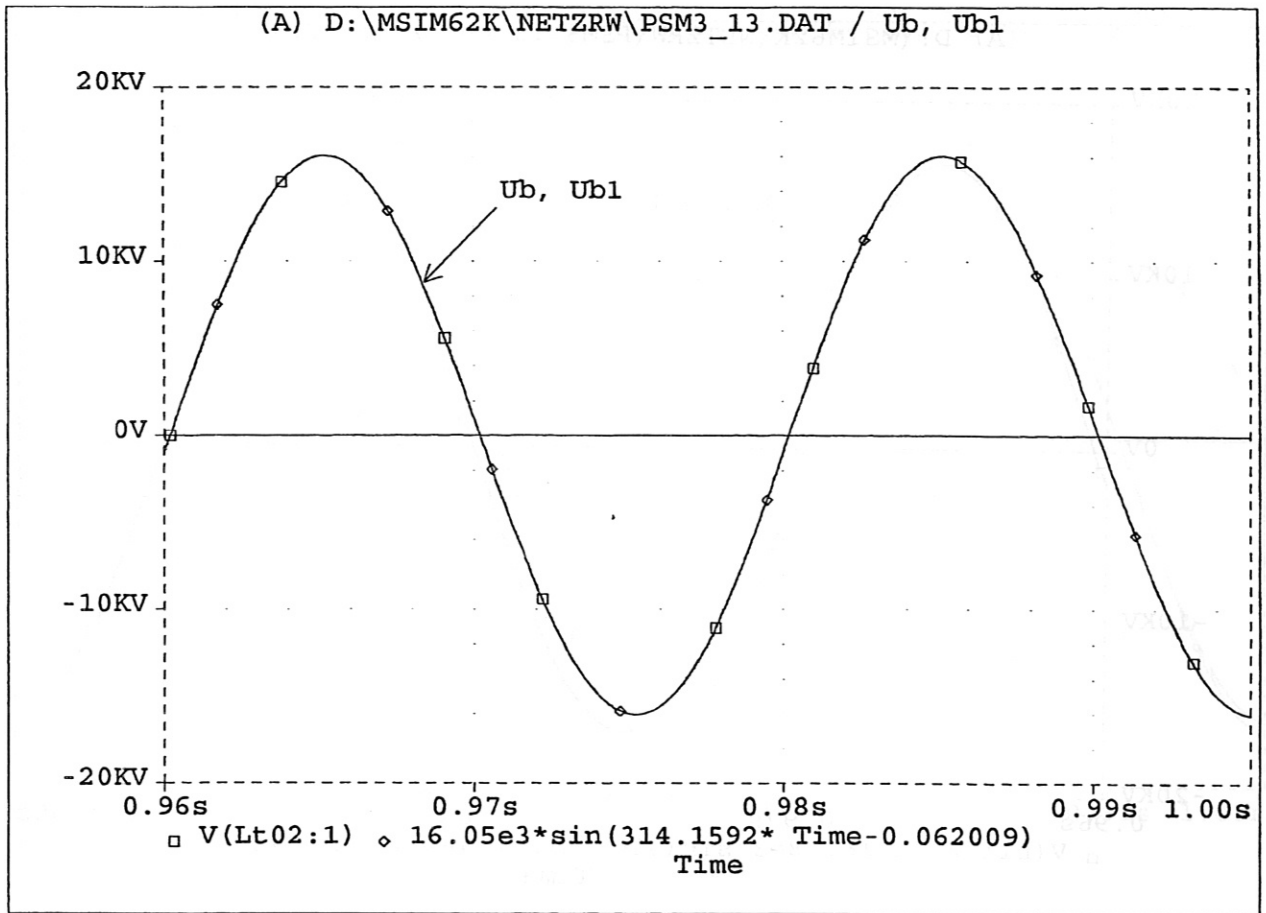
Abb. 8

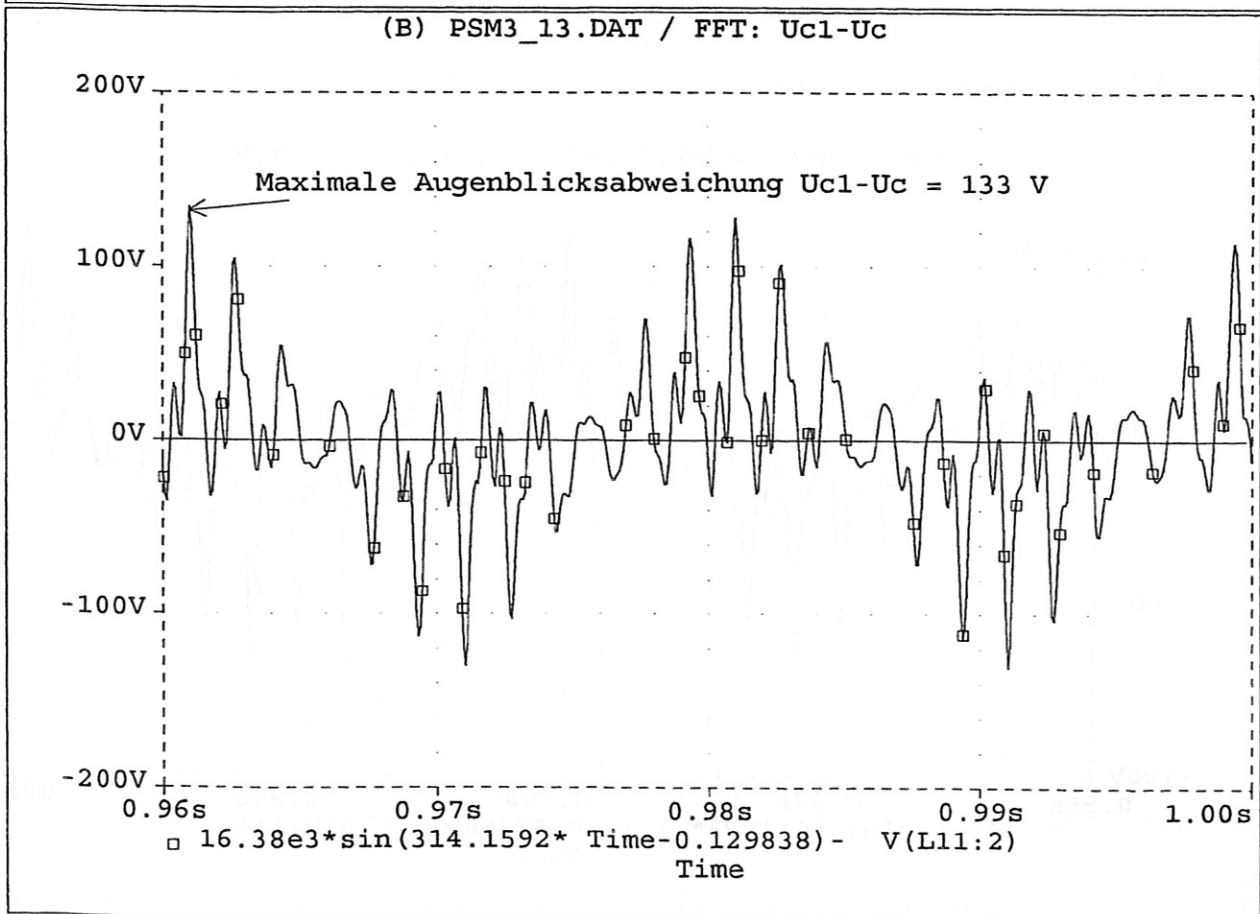
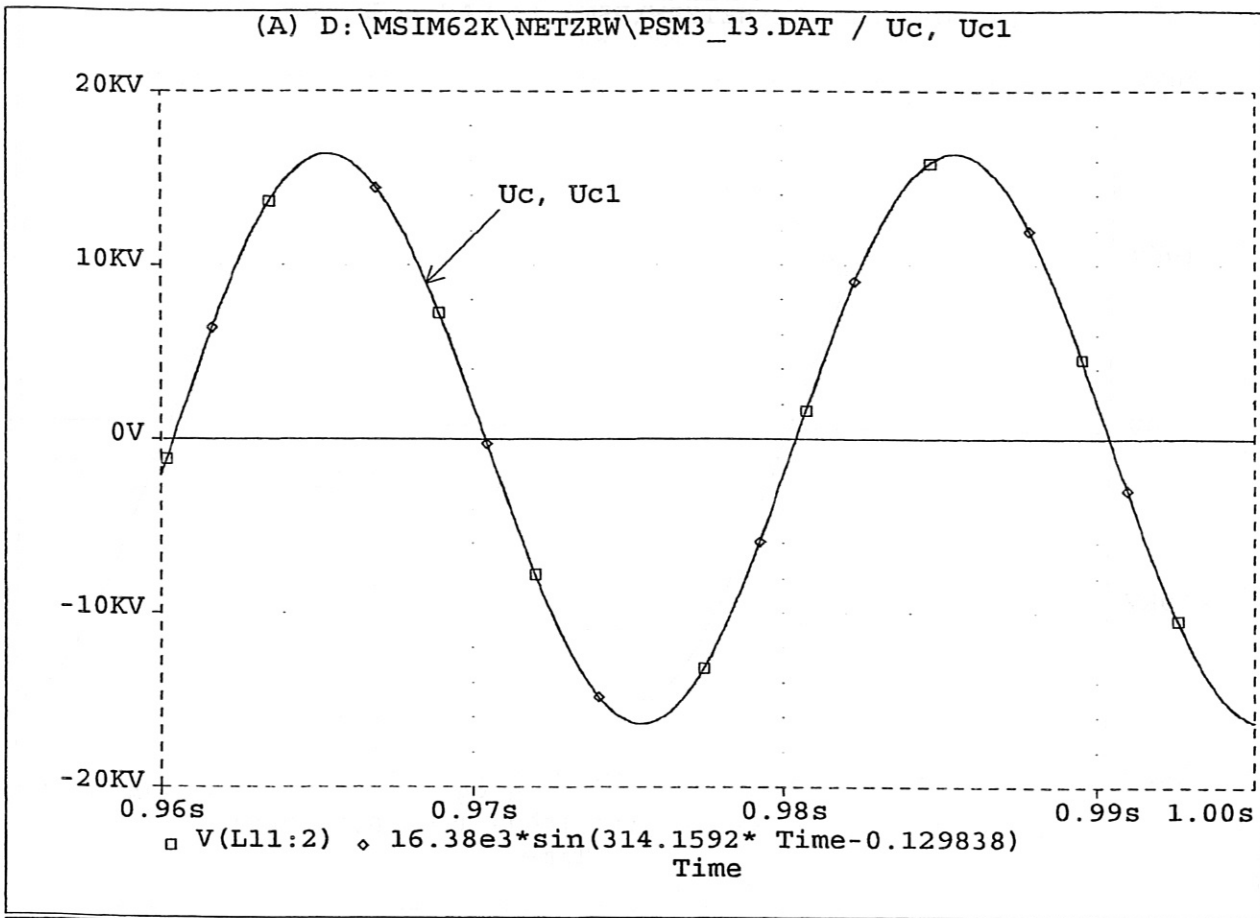


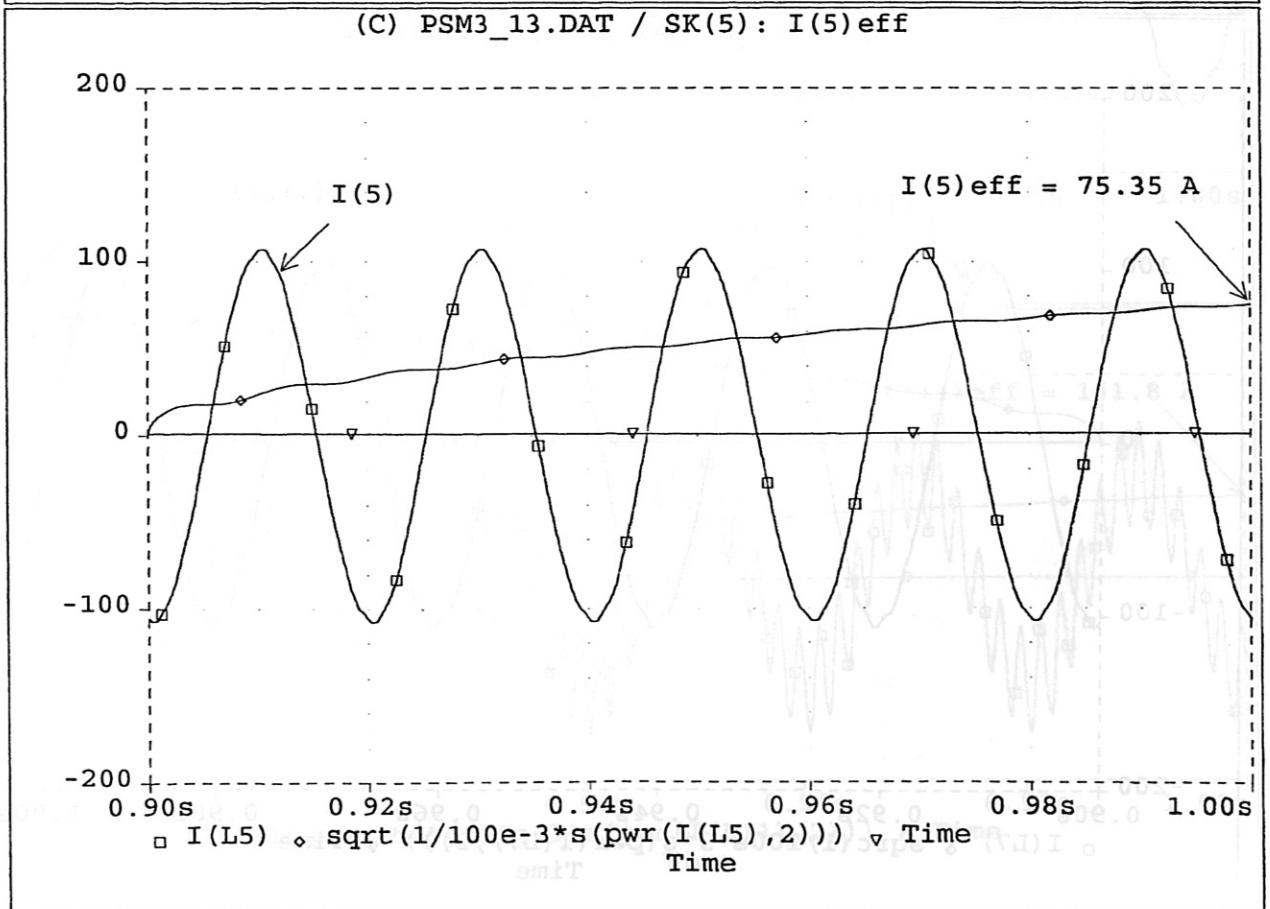
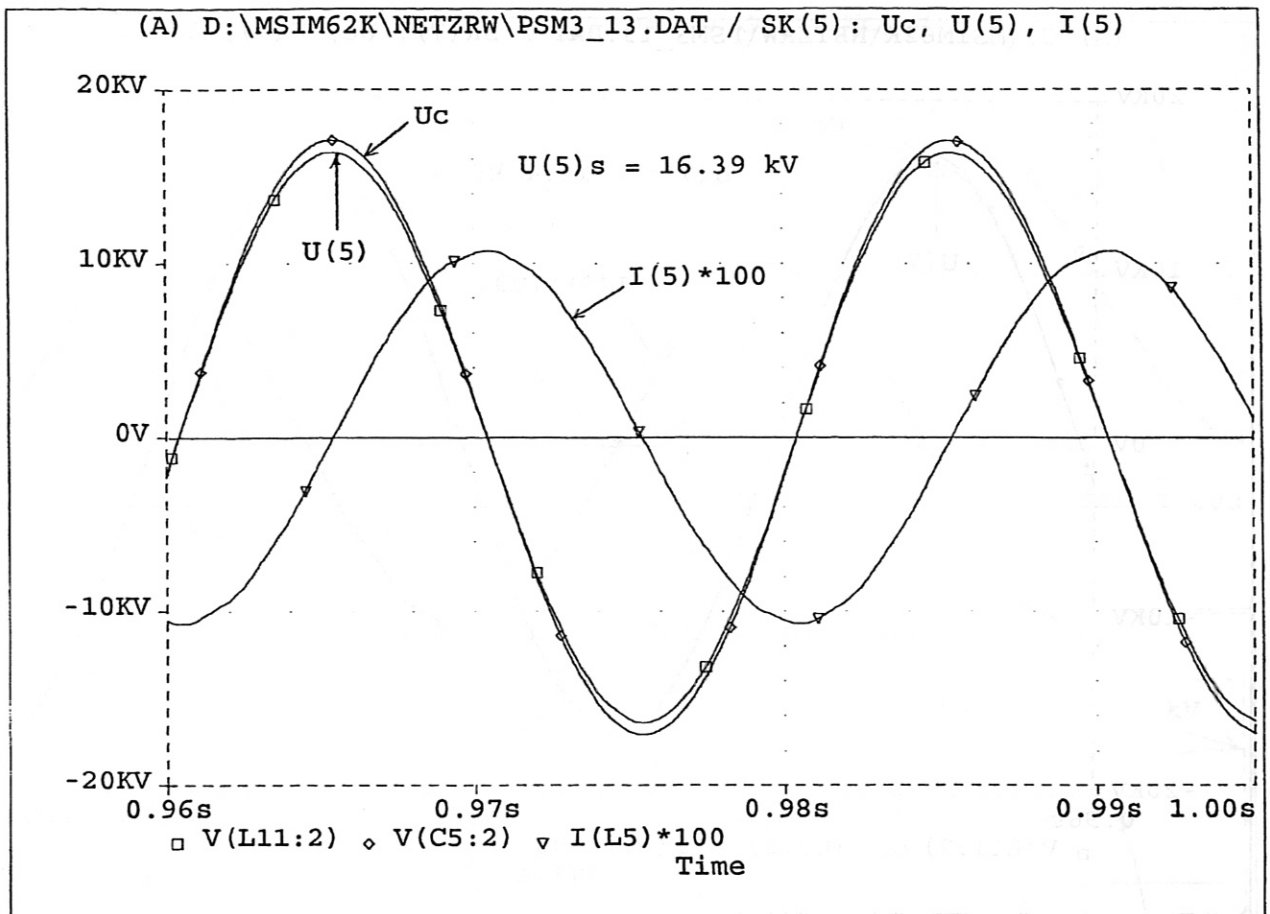


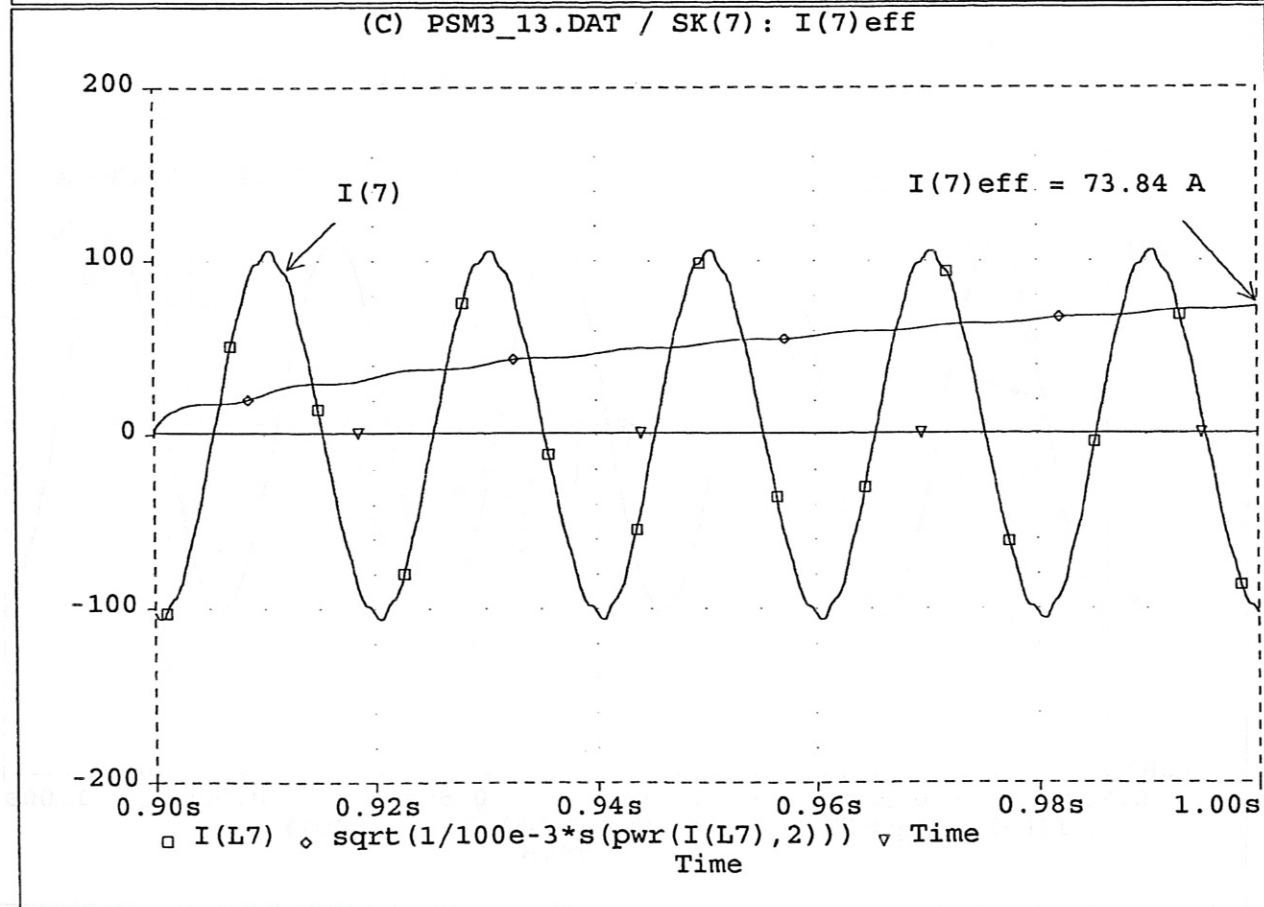
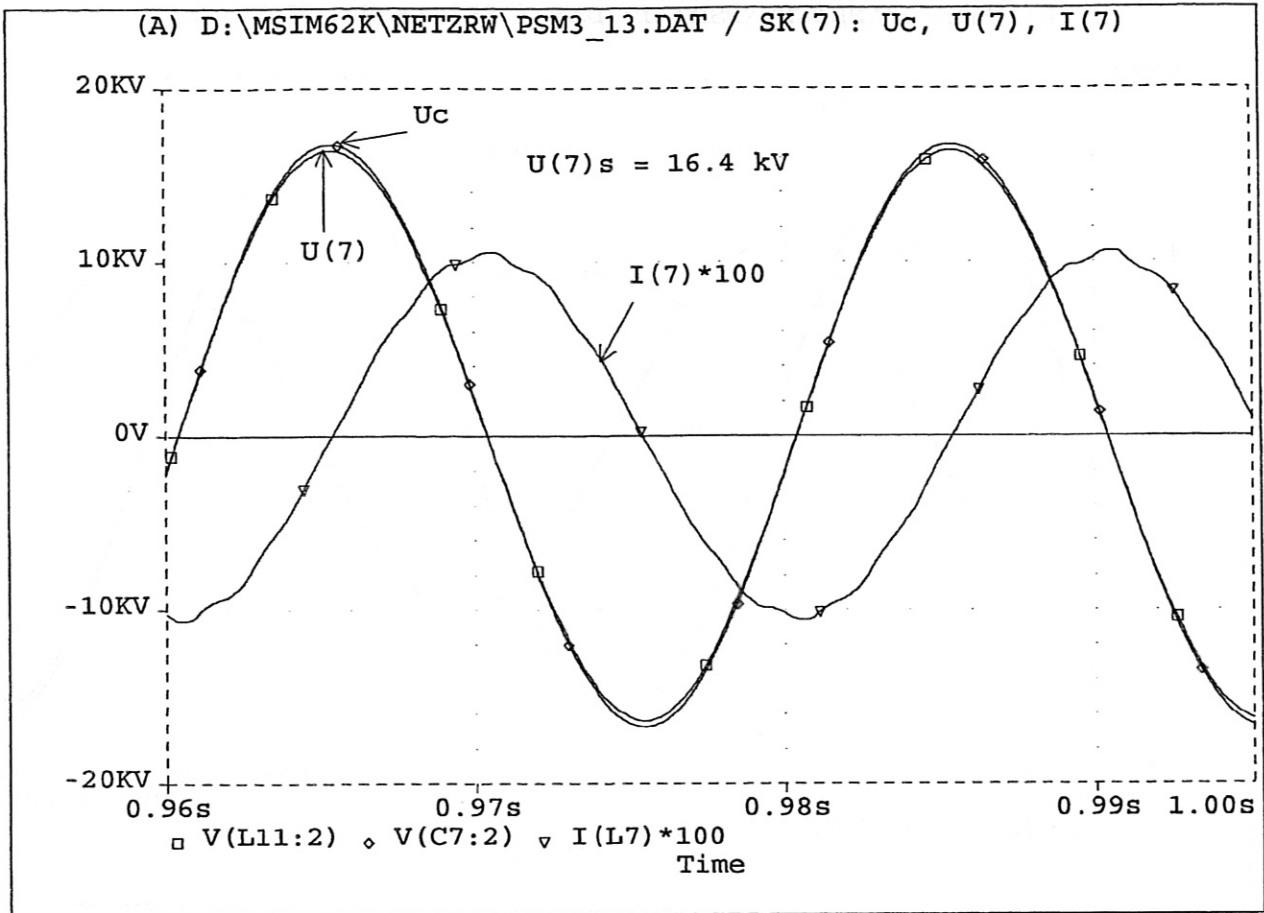


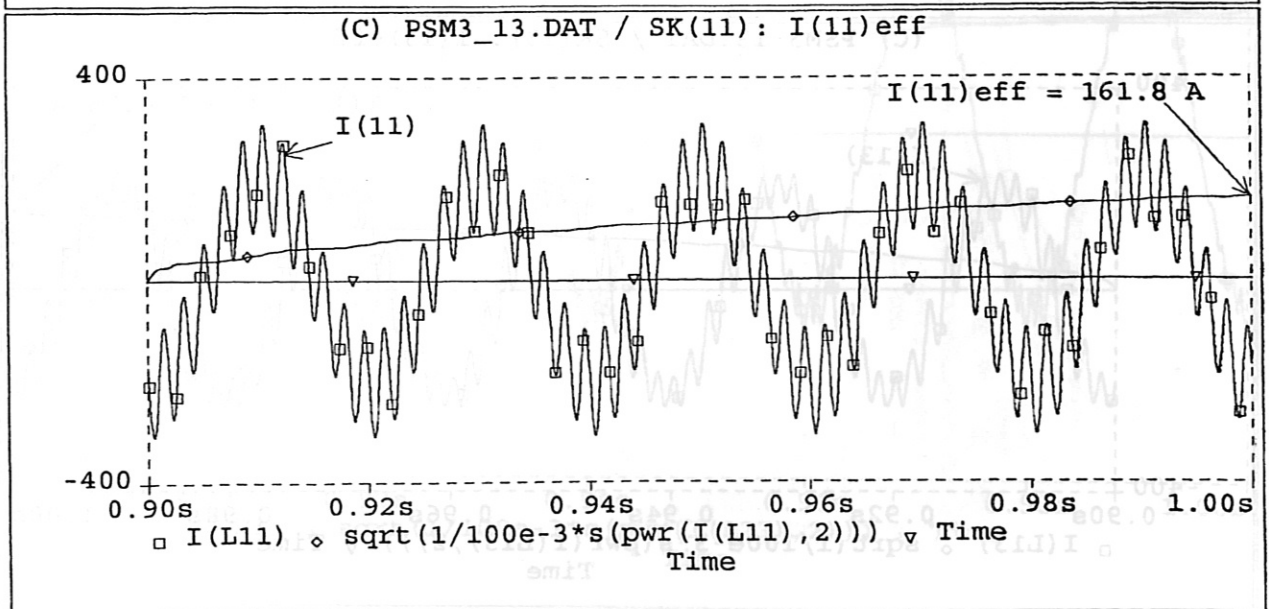
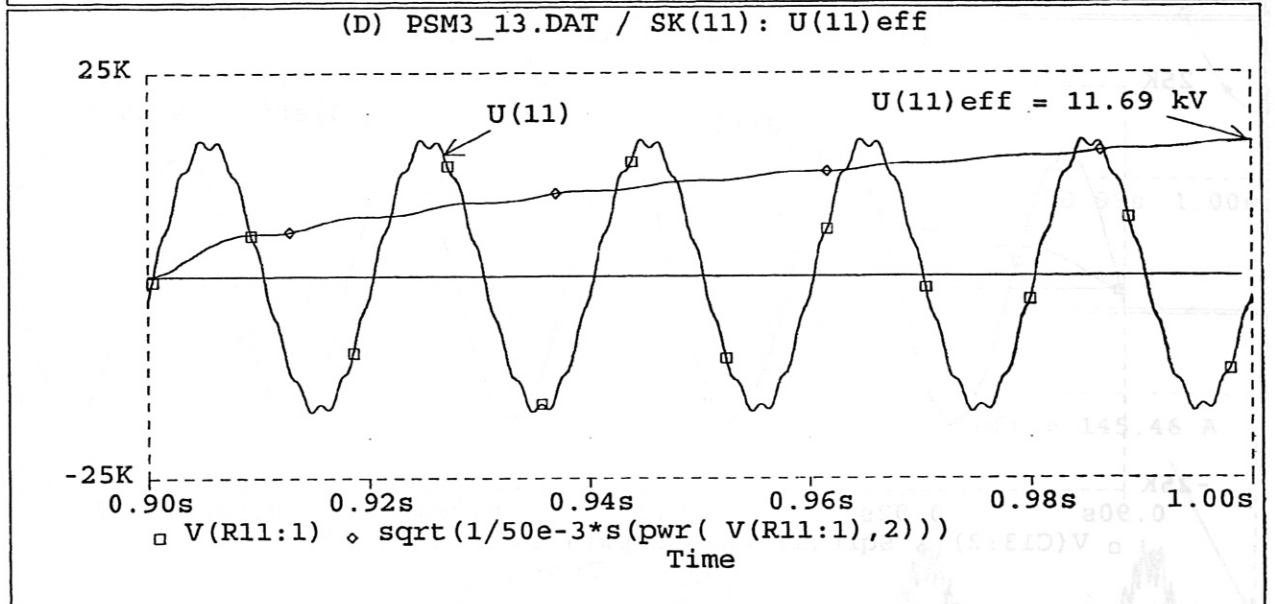
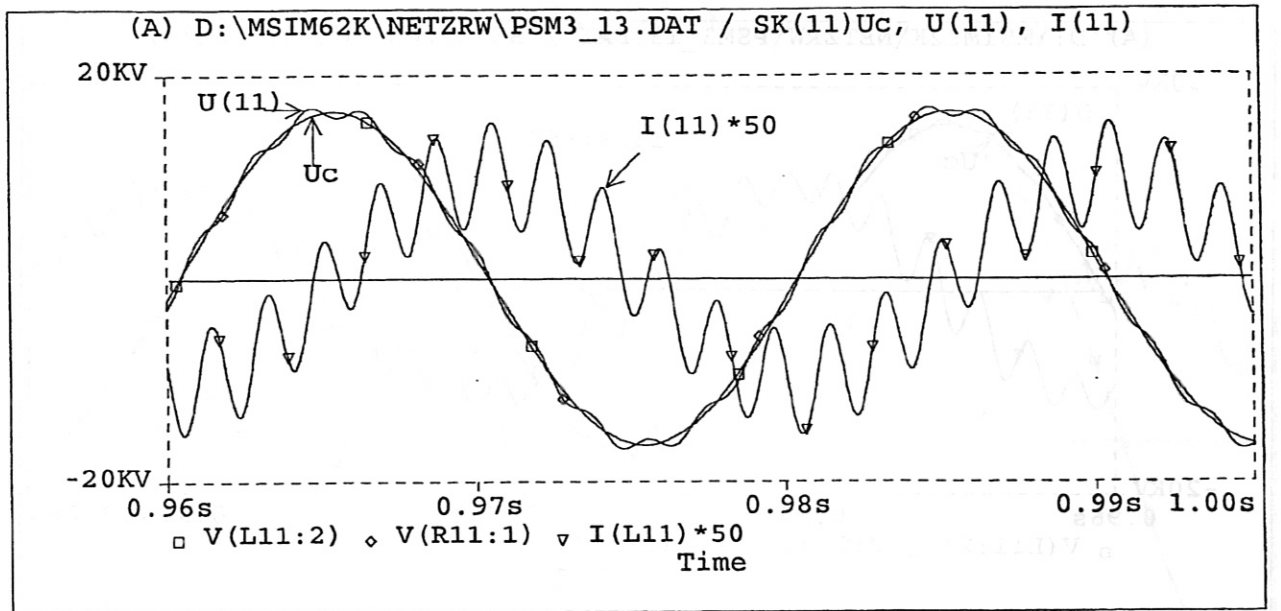


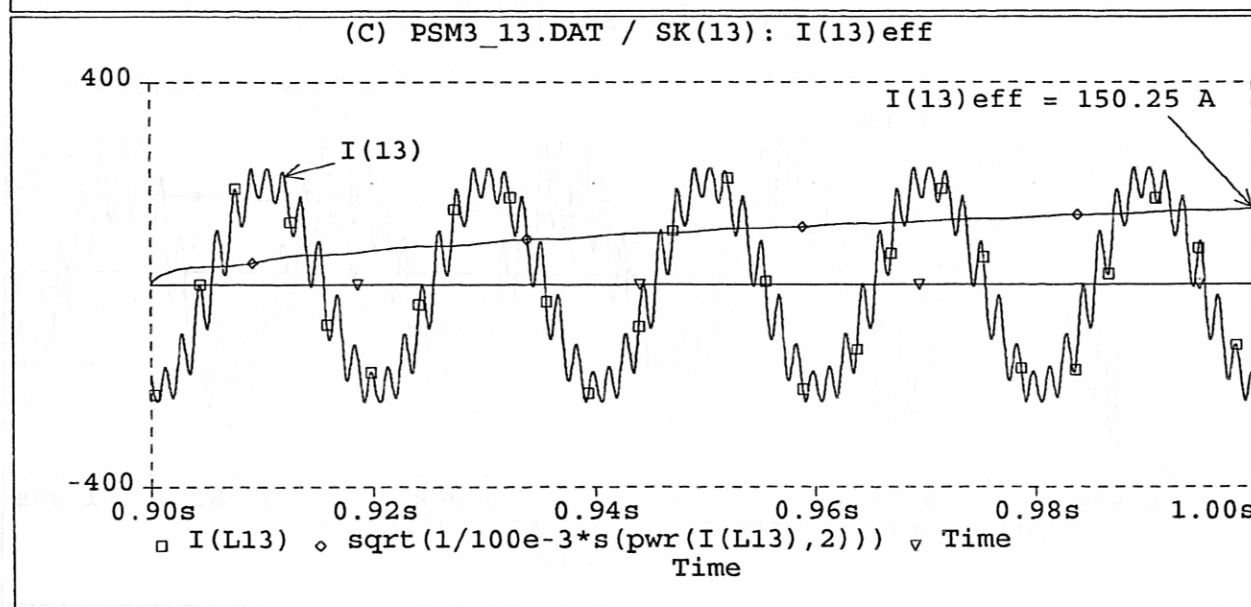
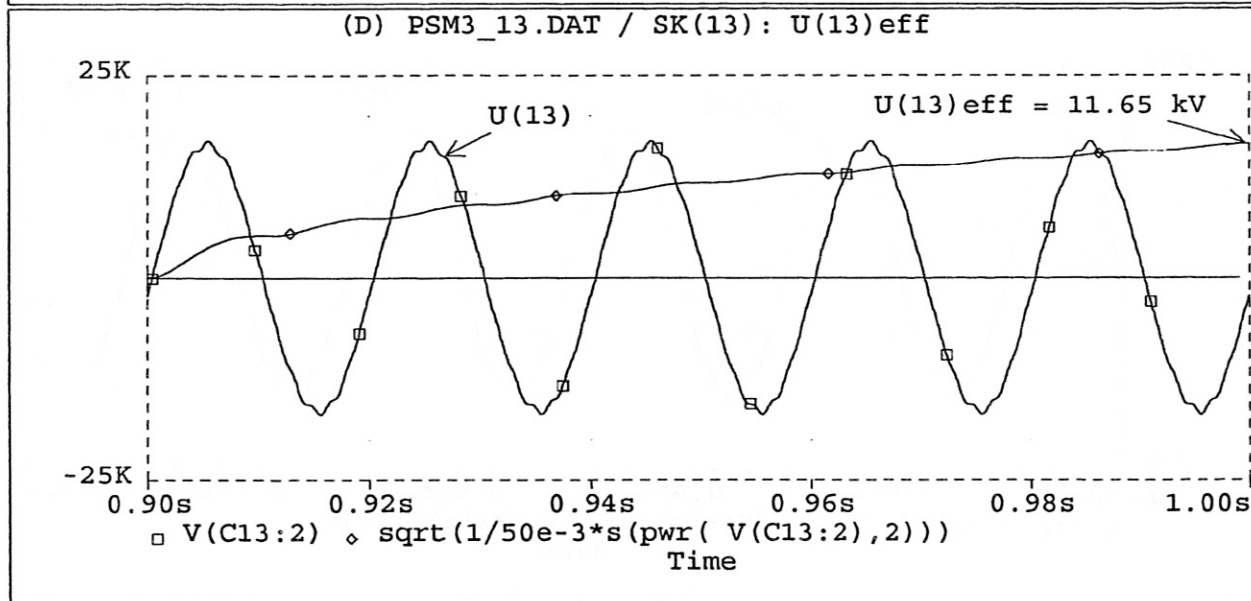
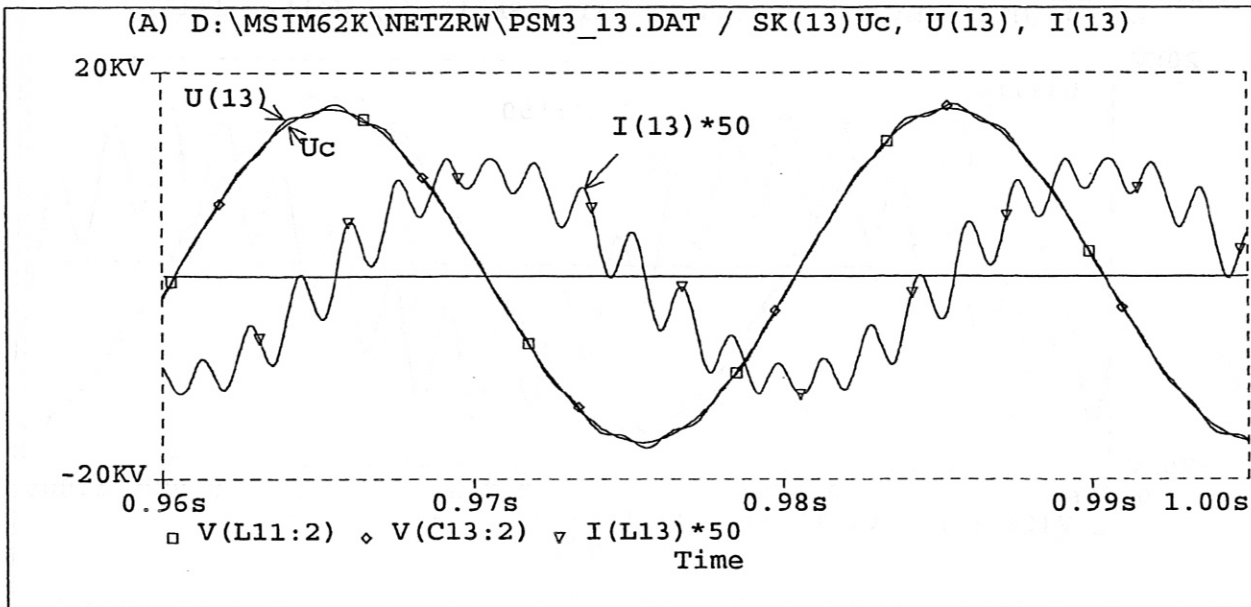




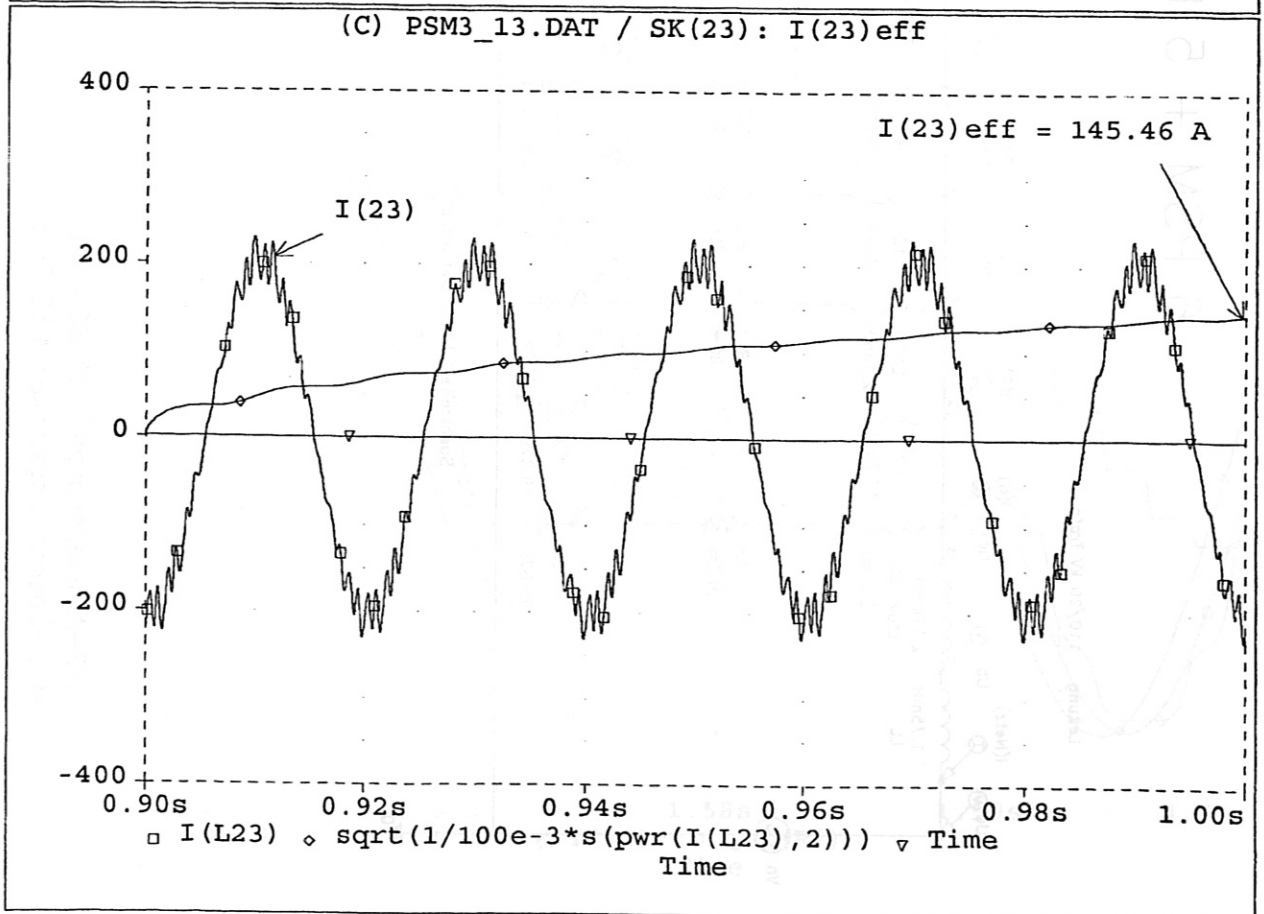
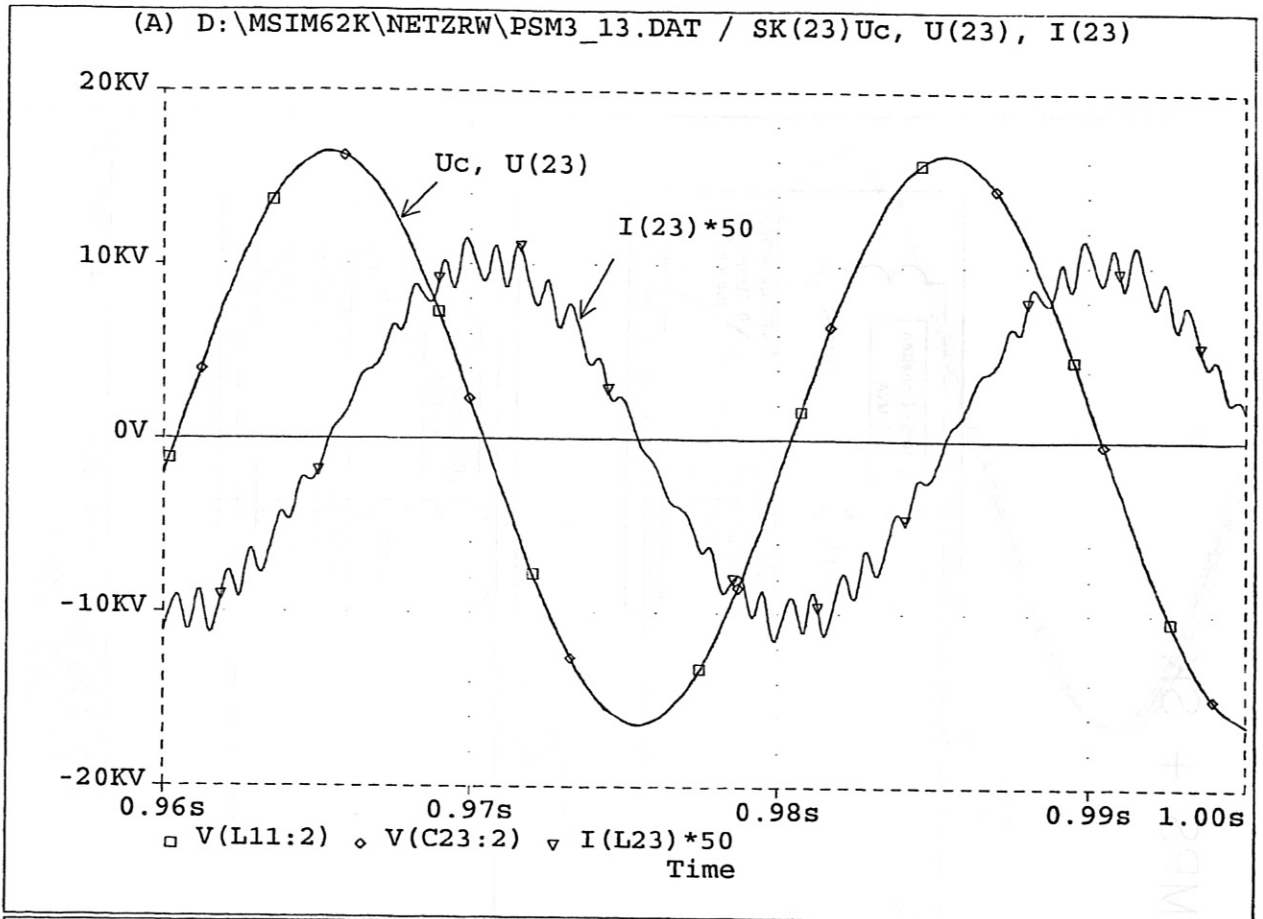




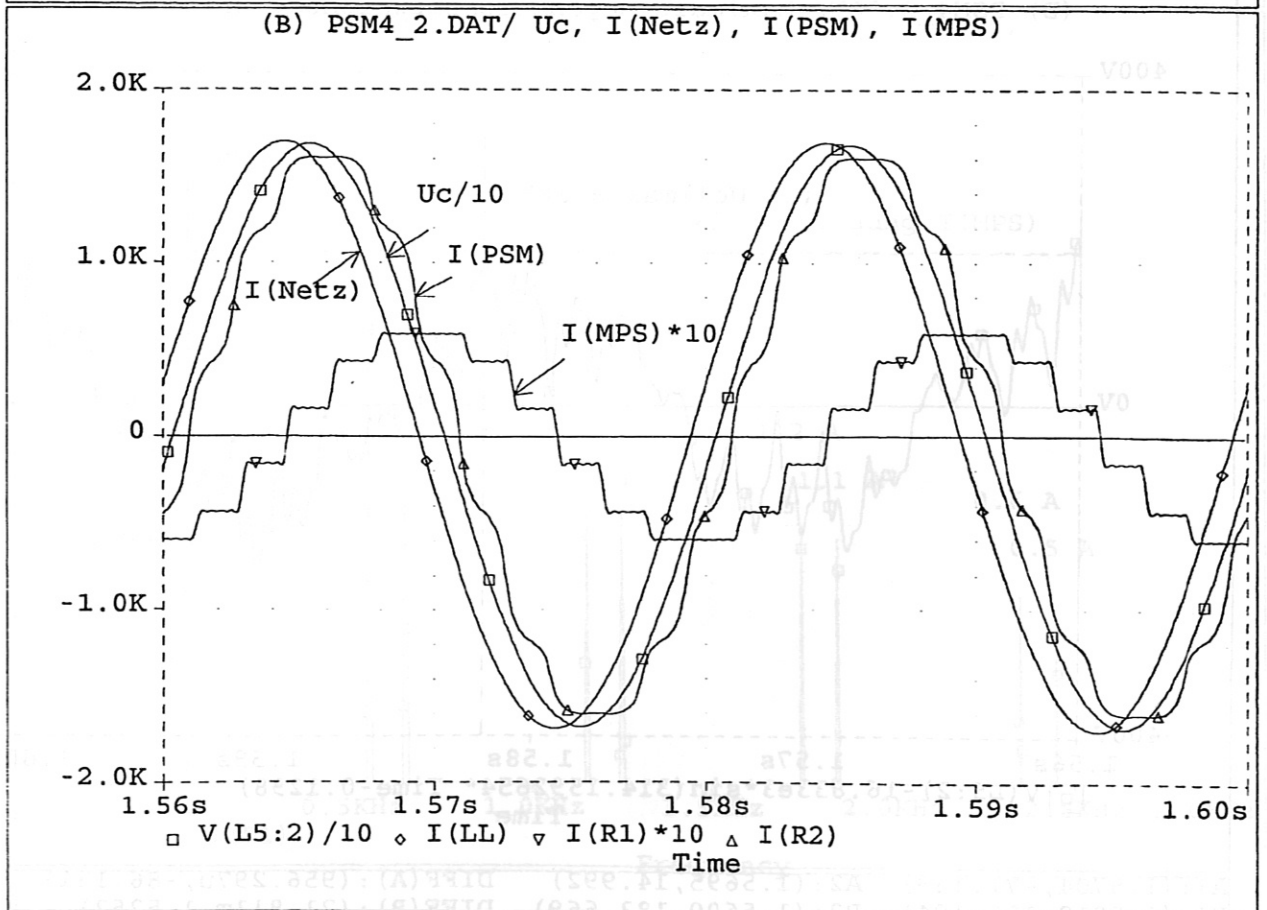
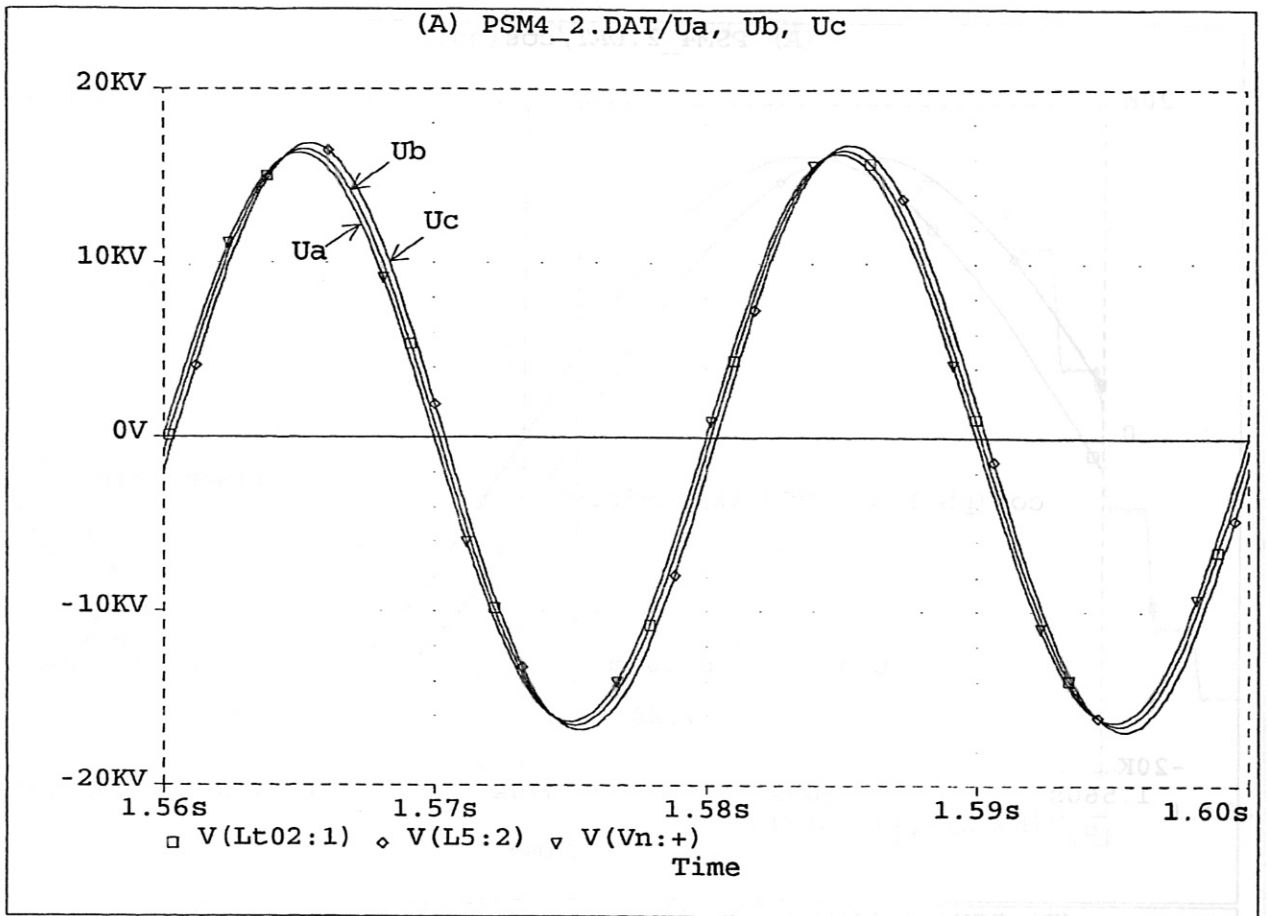


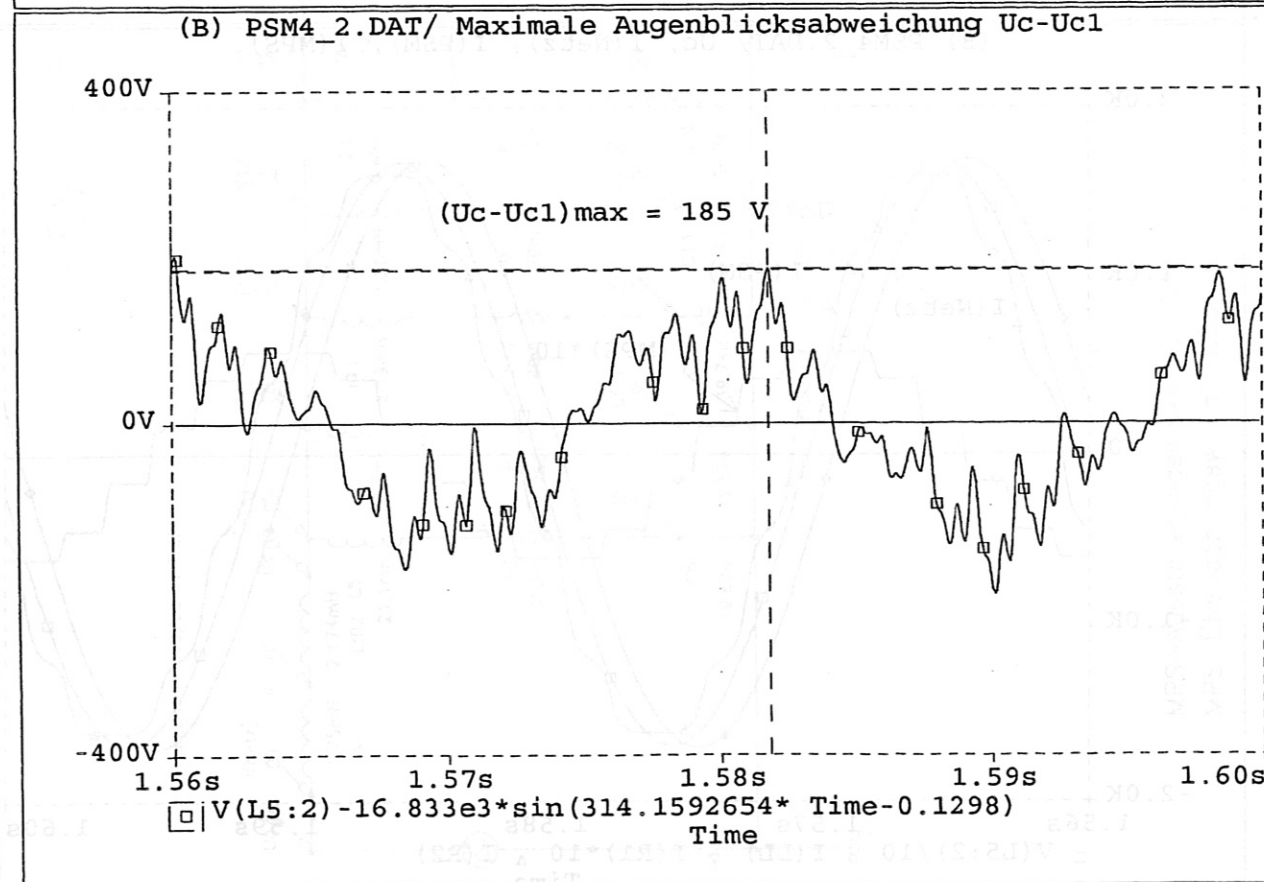
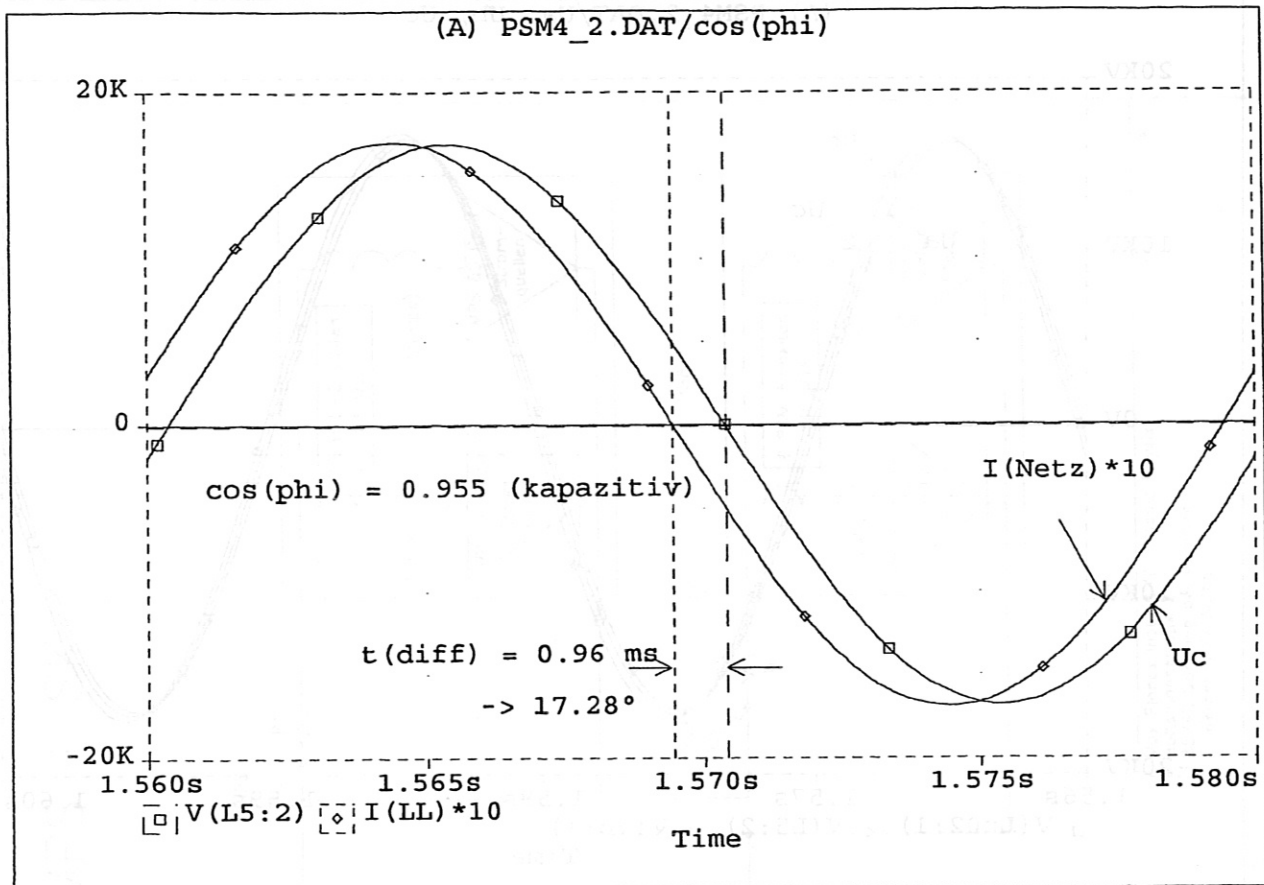




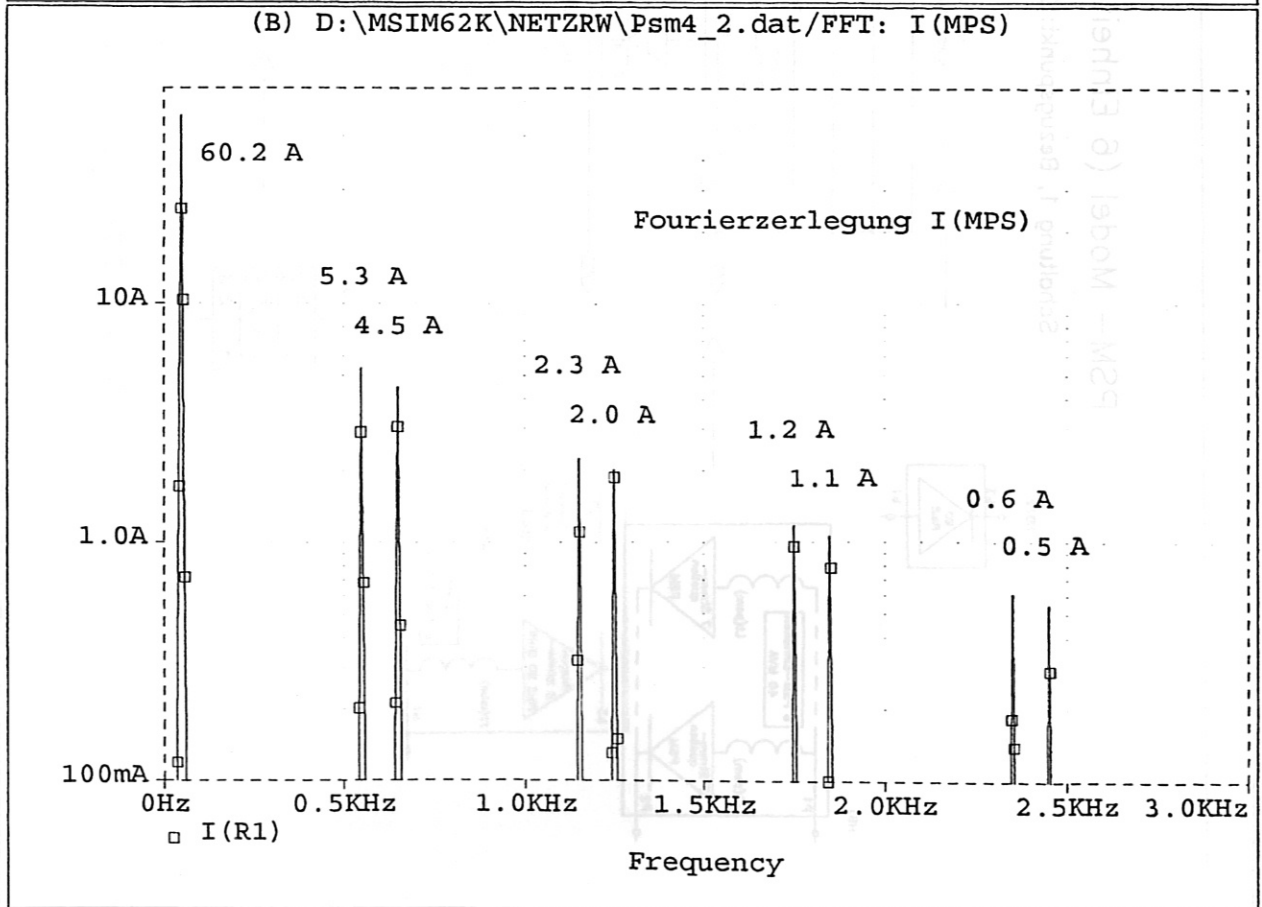
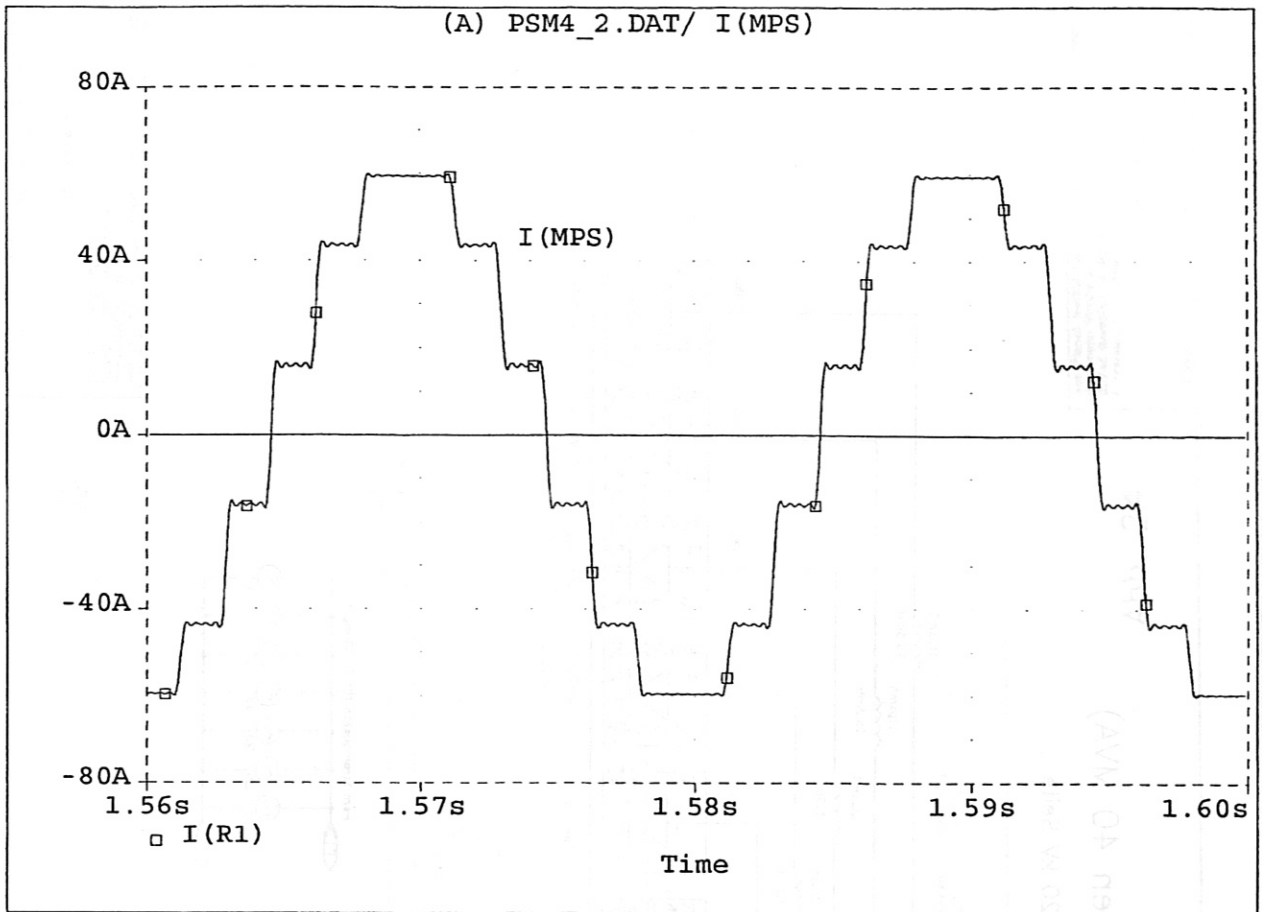








A1: (1.5704, -71.139)	A2: (1.5695, 14.992)	DIFF(A): (956.297u, -86.131)
B1: (1.5818, 185.194)	B2: (1.5600, 183.669)	DIFF(B): (21.811m, 1.5252)



# PSM- Model (6 Einheiten 40 MVA)

Schaltung 1, Bezugspunkt: 20 kV Seite

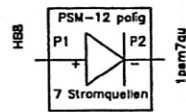
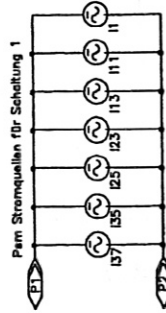
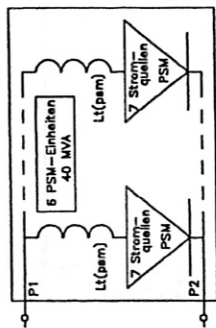
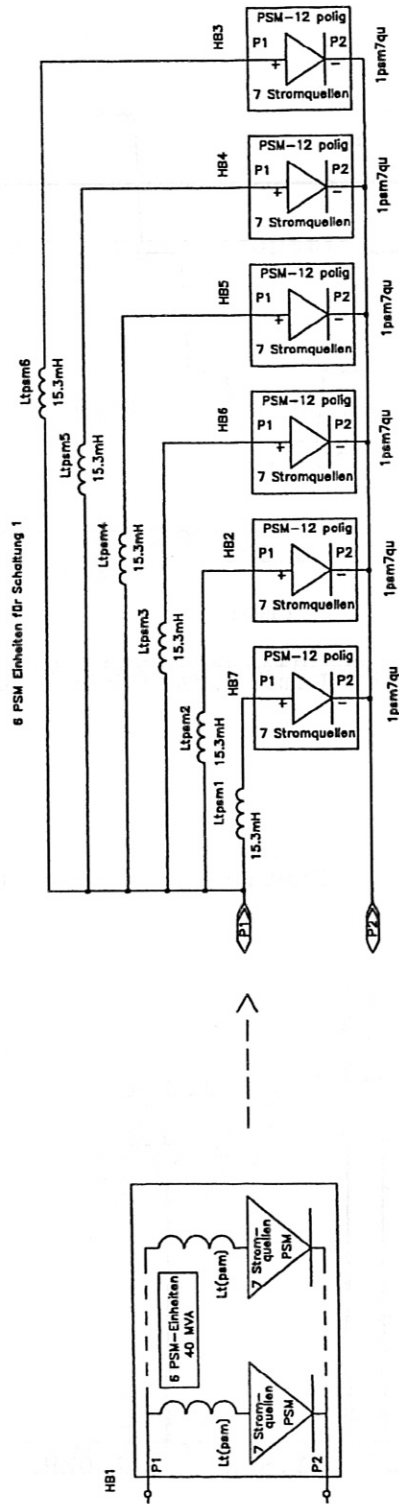


Abb. 23

# MPS- Model (5 Einheiten 1.5 MVA)

Schaltung 1, Bezugspunkt: 20 kV Seite

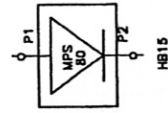
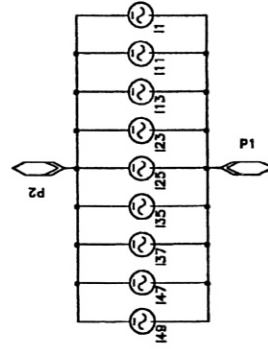
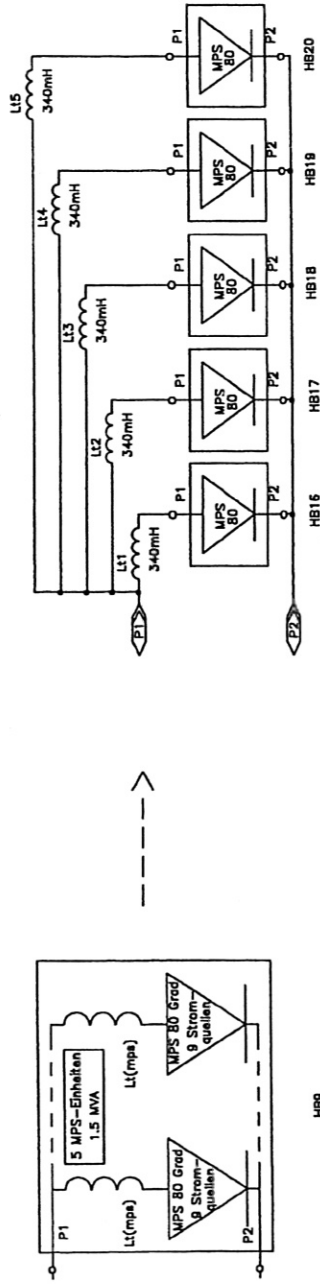


Abb. 24