

SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) CH 708 219 B1

(51) Int. Cl.: H02M 3/155 (2006.01)

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) **PATENTSCHRIFT**

| | | | |
|------------------------------------|------------|-----------------|---|
| (21) Anmeldenummer: | 01122/13 | (73) Inhaber: | ETH Zürich ETH Transfer, HG E 47-49 Rämistrasse 101 8092 Zürich ETH-Zentrum (CH) |
| (22) Anmeldedatum: | 14.06.2013 | (72) Erfinder: | Johann Walter Kolar, 8044 Zürich (CH) Patricio Cortes Estay, 8047 Zürich (CH) |
| (43) Anmeldung veröffentlicht: | 15.12.2014 | (74) Vertreter: | Frei Patentanwaltsbüro AG, Postfach 1771 8032 Zürich (CH) |
| (24) Patent erteilt: | 14.07.2017 | | |
| (45) Patentschrift veröffentlicht: | 14.07.2017 | | |

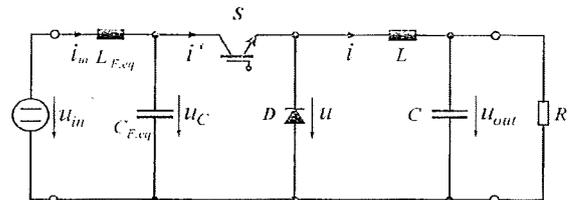
(54) **Verfahren zum Betreiben eines elektronischen Leistungswandlers.**

(57) Es wird ein allgemeines Verfahren zur Wandlerleistungsflussprogrammierung zum Betrieb eines elektronischen Stromwandlers vorgestellt. Das Verfahren ermöglicht unter anderem den Betrieb des Wandlers in jeder von den hier angeführten Betriebsarten:

- konstanter Eingangsstrom
- konstante Ausgangsspannung
- konstante Leistungsübertragung
- konstanter Eingangswiderstand

Der Stromwandler besteht aus einer Eingangfilterstufe (L_F , e_q , C_F , e_q), einem Schaltwandler (S, D) und einer Ausgangsfilterstufe (L, C).

Das erfindungsgemässe Verfahren sieht vor, aus einem Eingangsstromsollwert und aus einem Messwert des Ausgangsstroms (i) ein Tastverhältnis zu berechnen und für die Ansteuerung des Stromwandlers zu verwenden.



Beschreibung

[0001] Elektronische Leistungswandler können als eine Kombination von Schaltstufen und Filterstufen beschrieben werden, die eine Stromquelle mit einer Last verbinden. Beispielsweise kann der DC/DC-Stromwandler von Fig. 1 als einer beschrieben werden, der eine Eingangfilterstufe, einen Schaltwandler und eine Ausgangfilterstufe aufweist. Der Schaltwandler kann ein Abwärts-(Hochsetzsteller) oder Aufwärtstyp (Tiefsetzsteller) sein. Der in Fig. 1 dargestellte Stromwandler ist ein Abwärtswandler.

[0002] Verschiedene Dreiphasen-Wandlertopologien können als ein DC/DC-Wandler modelliert werden, um eine einfachere Berechnung der Regelungsverfahren, Dynamik und Stabilität des Systems vorzunehmen.

[0003] In dem in Fig. 1 dargestellten DC/DC-Stromwandler wird eine Beziehung zwischen den Eingangs- und Ausgangsspannungen und Strömen durch den Schaltzustand der Leistungshalbleiterbauelemente bestimmt. Wenn eine Modulationsstufe betrachtet wird, sind diese Beziehungen durch den Wert des entsprechenden Tastverhältnisses («duty cycle») d gegeben:

$$\bar{u} = d \cdot \bar{u}_C$$

$$\bar{i}' = d \cdot \bar{i}.$$

[0004] Das Tastverhältnis kann auf einen Wert angepasst werden, der die Ausgangsspannung oder den Eingangsstrom einem vorgegebenen Sollwert gleichmacht. Jedoch können aufgrund von Schwankungen der Eingangsspannung oder des Ausgangsstroms die Istwerte von den entsprechenden Sollwerten abweichen. Um die Ausgangsspannung u von möglichen Schwankungen der Eingangsspannung u_c unabhängig zu machen, kann eine Vorwärtskompensation für die Berechnung des Tastverhältnisses verwendet werden. Diese Idee wurde bereits zur Kompensation der DC-Zwischenkreis-Spannungsschwankungen in Wechselrichtern mit dreiphasiger Spannungsquelle genutzt.

[0005] Die Anwendung einer Vorwärtskompensation in Stromwandlern ist in der Literatur zu finden. Jedoch fehlt ein Vorwärtsschleifen nutzendes allgemeines Verfahren zur Programmierung eines vorgegebenen Verhaltens des Schaltwandlers.

[0006] Es wird ein allgemeines Verfahren für eine Wandlerleistungsflussprogrammierung präsentiert. Dieses Verfahren wird durch die unterschiedlichen Verfahren gemäss den unabhängigen Ansprüchen verkörpert. Das Verfahren ermöglicht, unter anderem, den Betrieb des Schaltwandlers in jeder der hier angeführten Betriebsarten:

- konstanter Eingangsstrom (Fig. 2)
- konstante Ausgangsspannung (Fig. 3)
- konstante Leistungsübertragung (Fig. 4)
- konstanter Eingangswiderstand (Fig. 5)

[0007] Konstanter Eingangsstrom (Fig. 2)

$$d = \frac{i'^{*}}{\bar{i}}$$

[0008] Ein Verfahren zum Entkoppeln des Eingangsstroms von Schwankungen des Ausgangsstroms kann implementiert werden, indem eine Vorwärtsschleife des Ausgangsinduktivitätsstroms i gemäss Darstellung in Fig. 2 einbezogen wird. Durch Berechnen des Tastverhältnisses unter Verwendung des Istwertes des Ausgangsstroms,

$$d = \frac{i'^{*}}{\bar{i}}$$

ist der resultierende Eingangsstrom gleich seinem Sollwert $i=i'^{*}$. In der vorstehenden Formel wird der Istwert des Ausgangsstroms i durch einen gefilterten oder gemittelten Wert \bar{i} dargestellt. Ebenso können Spannungswerte gegebenenfalls durch gemittelte Werte \bar{v} , \bar{v}_c dargestellt oder ersetzt werden.

[0009] Konstante Ausgangsspannung (Fig. 3)

[0010] Ein Verfahren zum Entkoppeln der Ausgangsspannung von Schwankungen der Eingangsspannung wird durch Einbeziehen einer Vorwärtsschleife der Eingangskondensatorspannung u_c gemäss Darstellung in Fig. 3 implementiert. Durch Berechnung des Tastverhältnisses unter Verwendung des Istwertes der Eingangsspannung,

$$d = \frac{u^*}{\bar{u}_C}$$

ist die resultierende Ausgangsspannung gleich ihrem Sollwert,

$$\bar{u} = u^*.$$

[0011] Konstante Leistungsübertragung (Fig. 4)

[0012] Dieses Steuerungsschema basiert auf einem Leistungsgleichgewicht zwischen dem Eingang und Ausgang der Schaltstufe des Wandlers. Bei vorgegebenem Leistungs-Sollwert P^* wird der erforderliche Eingangsstrom-Sollwert berechnet als

$$i'^* = \frac{P^*}{\bar{u}_C},$$

und dann das erforderliche Tastverhältnis ausgedrückt als

$$d = \frac{i'^*}{\bar{i}} = \frac{P^*}{\bar{u}_C \cdot \bar{i}}$$

[0013] Dieses Verfahren führt zu der Einbeziehung von Vorwärtsschleifen der Eingangskondensatorspannung u_c und des Ausgangsinduktorstroms i .

[0014] Dieses Steuerungsschema ergibt einen vollständig entkoppelten Betrieb des Eingangsfilters und des Wandlerausgangs.

[0015] Konstanter Eingangswiderstand (Fig. 5)

[0016] Die Eingangsseite des Schaltwandlers kann so programmiert werden, dass sie ein Widerstandsverhalten präsentiert. Dieses kann erreicht werden, indem ein Eingangsstrom-Sollwert i'^* programmiert wird, der proportional zu der Eingangsspannung u_c und insbesondere zu einem gefilterten oder gemittelten Wert ist:

$$i'^* = G^* \cdot \bar{u}_C,$$

wobei G^* der Sollwert des Eingangsleitwertes ($G=1/R$) ist. Dann wird das Tastverhältnis berechnet als

$$d = \frac{i'^*}{\bar{i}} = \frac{G^* \cdot \bar{u}_C}{\bar{i}}$$

[0017] Diese Ideen können auf einen Aufwärtswandler angewendet werden, und die dualen Steuerverfahren können definiert werden als:

- konstante Eingangsspannung
- konstanter Ausgangsstrom
- konstante Leistungsübertragung
- konstanter Ausgangswiderstand

Anwendung der Wandlerleistungsflussprogrammierung auf einem Dreiphasen-Abwärts-AC/DC-Wandler (SWISS-Rectifier).

[0018] Ein Beispiel der Anwendung dieser Konzepte auf einen Dreiphasenwandler wird für den in Fig. 10 dargestellten Dreiphasen-Abwärts-SWISS-Rectifier dargestellt.

[0019] Der SWISS-Rectifier kann als ein äquivalenter DC/DC-Abwärtswandler wie der in Fig. 1 dargestellte modelliert werden. Ein Konstantleistungs-Übertragungsverfahren wird implementiert und Ergebnisse für eine Sprungänderung in der Sollleistung P^* sind in Fig. 11 dargestellt.

[0020] Simulationsergebnisse für das Dreiphasensystem (siehe Fig. 10) sind in Fig. 12 für eine Sprungänderung in der Sollleistung P^* dargestellt. Die Ausgangsspannung zeigt ein sehr gut gedämpftes Verhalten und es wird eine entkoppelte Antwort auf das Eingangsfilter beobachtet.

[0021] Eine gute Übereinstimmung in dem dynamischen Verhalten des Dreiphasensystems in Bezug auf das DC/DC-Modell wird beobachtet.

Beschreibung der Figuren

[0022]

- Fig. 1 stellt einen DC/DC-Abwärtswandler mit Eingangs- und Ausgangsfiltern dar.
- Fig. 2 stellt das Steuerungsschema für konstanten Wandlerleistungsstrom dar.
- Fig. 3 stellt das Steuerungsschema für konstante Wandlerausgangsspannung dar.
- Fig. 4 stellt das Steuerungsschema für konstanten Wandlerleistungsfluss dar.
- Fig. 5 stellt das Steuerungsschema für konstanten Wandlerleistungswiderstand dar.
- Fig. 6 stellt die Kleinsignal-Ersatzschaltung des Schaltwandlers dar, wenn eine Konstanteingangsstromsteuerung verwendet wird. Die Strom/Spannungs-Kennlinie für den Eingangsstrom und die Eingangsspannung ist ebenfalls dargestellt. Die Eingangsseite kann als eine ideale Stromquelle modelliert werden, während die Ausgangsseite als eine Spannungsquelle mit einem Innenserienwiderstand r_0 modelliert wird. Der Innenwiderstand r_0 sorgt für eine Dämpfung der Ausgangsfilterresonanz.
- Fig. 7 stellt die Kleinsignal-Ersatzschaltung des Schaltwandlers dar, wenn die Konstantausgangsspannungssteuerung verwendet wird. Die Strom/Spannungs-Kennlinie für den Ausgangsstrom und die Ausgangsspannung ist ebenfalls dargestellt. Die Eingangsseite kann als eine Stromquelle mit einem negativen parallelen Innenwiderstand r_i modelliert werden, während die Ausgangsseite als eine ideale Spannungsquelle modelliert wird.
- Fig. 8 stellt die Kleinsignal-Ersatzschaltung des Schaltwandlers dar, wenn die Konstantleistungsflusssteuerung verwendet wird. Die Strom/Spannungs-Kennlinie für die Eingangs- und Ausgangsströme und -Spannungen ist ebenfalls dargestellt. Die Eingangsseite kann als eine Stromquelle mit einem negativen parallelen Innenwiderstand r_i modelliert werden, während die Ausgangsseite als eine Spannungsquelle mit einem Innenserienwiderstand r_0 modelliert wird. Die Eingangs- und Ausgangsseiten arbeiten an unterschiedlichen Punkten derselben Konstantleistungskurve.
- Fig. 9 stellt die Kleinsignal-Ersatzschaltung des Schaltwandlers dar, wenn die Steuerung für konstanten Eingangswiderstand verwendet wird. Die Strom/Spannungs-Kennlinie für die Eingangs- und Ausgangsströme und -Spannungen sind ebenfalls dargestellt. Die Eingangsseite kann als eine Stromquelle mit einem positiven parallelen Innenwiderstand r_i modelliert werden, der durch den Leitwert G^* definiert ist. Die Ausgangsseite wird als eine Spannungsquelle mit einem Innenserienwiderstand r_0 modelliert.
- Fig. 10 stellt den Leistungsschaltkreis eines Dreiphasen-Abwärts-SWISS-Rectifiers dar.
- Fig. 11 stellt Simulationsergebnisse für ein DC/DC-Ersatzmodell des SWISS-Rectifiers unter Verwendung eines konstante Leistungsübertragungs-Steuerungsverfahrens dar. Es wird eine sprunghafte Änderung in der Sollleistung P^* angelegt.
- Fig. 12 stellt Simulationsergebnisse für den SWISS-Rectifier unter Verwendung eines Konstantleistungsübertragungs-Steuerungsverfahrens dar. Es wird eine sprunghafte Änderung in der Sollleistung P^* angelegt.
- Fig. 13 stellt einen Aufwärtswandler dar, der aufweist: eine Eingangsfilterstufe ($L_{F,eq}$) mit einer Nennspannung u_{in} und einem Eingangsstrom i_{in} ; einen Schaltwandler {S,D} mit einer Eingangsspannung u und einem Ausgangsstrom i , und die mit einem Tastverhältnis d arbeiten; und eine Ausgangsfilterstufe (C) mit einer Ausgangsspannung u_{out} .

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben eines elektronischen Stromwandlers, wobei der Stromwandler durch einen Abwärtswandler repräsentiert wird, der aufweist:
eine Eingangsfilterstufe ($L_{F,eq}$, $C_{F,eq}$) mit einer Nenneingangsspannung u_{in} und einer Eingangskondensatorspannung u_c und einem Eingangsstrom i_{in} ;
einen Schaltwandler (S,D) mit einem Eingangsstrom i' und einem Ausgangsstrom i , und die mit einem Tastverhältnis d arbeiten;
und eine Ausgangsfilterstufe (L,C);
wobei das Verfahren, um einen konstanten Eingangsstrom i' zum Schaltwandler zu erreichen, die Schritte aufweist:
Berechnen, aus einem vorgegebenen Eingangsstromsollwert i'^* und aus einem Messwert des Ausgangsstroms i , des Tastverhältnisses, dass es zu $d = i'^*/i$ wird, und
Betreiben des Schaltwandlers mit diesem Tastverhältnis.
2. Verfahren zum Betreiben eines elektronischen Stromwandlers, wobei der Stromwandler durch einen Abwärtswandler repräsentiert wird, der aufweist:
eine Eingangsfilterstufe ($L_{F,eq}$, $C_{F,eq}$) mit einer Nenneingangsspannung u_{in} und einer Eingangskondensatorspannung u_c und einem Eingangsstrom i_{in} ;
einen Schaltwandler (S, D) mit einem Eingangsstrom i' und einem Ausgangsstrom i , und die mit einem Tastverhältnis d arbeiten;
und eine Ausgangsfilterstufe (L, C);
wobei das Verfahren, um eine konstante Leistungsübertragung P durch den Wandler zu erreichen, die Schritte aufweist:
Berechnen, aus einem vorgegebenen Leistungssollwert P^* und aus einem Messwert des Ausgangsstroms i und aus einem Messwert der Eingangskondensatorspannung u_c , des Tastverhältnisses, dass es zu $d = P^*/(u_c/i)$ wird, und
Betreiben des Schaltwandlers mit diesem Tastverhältnis.
3. Verfahren zum Betreiben eines elektronischen Stromwandlers, wobei der Stromwandler durch einen Abwärtswandler repräsentiert wird, der aufweist:
eine Eingangsfilterstufe ($L_{F,eq}$, $C_{F,eq}$) mit einer Nenneingangsspannung u_{in} und einer Eingangskondensatorspannung u_c und einem Eingangsstrom i_{in} ;
einen Schaltwandler (S,D) mit einem Eingangsstrom i' und einem Ausgangsstrom i , und die mit einem Tastverhältnis d arbeiten;
und eine Ausgangsfilterstufe (L,Q);
wobei das Verfahren, um eine konstante Ausgangsspannung u des Schaltwandlers zu erreichen, die Schritte aufweist:
Berechnen, aus einem vorgegebenen Ausgangsspannungssollwert u^* und aus einem Messwert der Eingangskondensatorspannung u_c , des Tastverhältnisses, dass es zu $d = u^*/u_c$ wird, und
Betreiben des Schaltwandlers mit diesem Tastverhältnis.
4. Verfahren zum Betreiben eines elektronischen Stromwandlers, wobei der Stromwandler durch einen Aufwärtswandler repräsentiert wird, der aufweist:
eine Eingangsfilterstufe ($L_{F,eq}$) mit einer Nenneingangsspannung u_{in} und einem Eingangsstrom i_{in} ;
einen Schaltwandler (S, D) mit einer Eingangsspannung u und einem Ausgangsstrom i , und die mit einem Tastverhältnis d arbeiten;
und eine Ausgangsfilterstufe (C) mit einer Ausgangsspannung u_{out} ;
wobei das Verfahren, um eine konstante Eingangsspannung u des Schaltwandlers zu erreichen, die Schritte aufweist:
Berechnen, aus einem vorgegebenen Eingangsspannungssollwert u^* und aus einem Messwert der Ausgangsspannung u_{out} des Tastverhältnisses, dass es zu $d = u^*/u_{out}$ wird, und
Betreiben des Schaltwandlers mit diesem Tastverhältnis.
5. Verfahren zum Betreiben eines elektronischen Stromwandlers, wobei der Stromwandler durch einen Aufwärtswandler repräsentiert wird, der aufweist:
eine Eingangsfilterstufe ($L_{F,eq}$) mit einer Nenneingangsspannung u_{in} und einem Eingangsstrom i_{in} ;
einen Schaltwandler (S, D) mit einer Eingangsspannung u und einem Ausgangsstrom i , und die mit einem Tastverhältnis d arbeiten;
und eine Ausgangsfilterstufe (C) mit einer Ausgangsspannung u_{out} ;
wobei das Verfahren, um einen konstanten Ausgangsstrom i des Schaltwandlers zu erreichen, die Schritte aufweist:
Berechnen, aus einem vorgegebenen Eingangsstromsollwert i^* und aus einem Messwert des Eingangsstroms i_{in} , des Tastverhältnisses, dass es zu $d = i^*/i_{in}$ wird, und
Betreiben des Schaltwandlers mit diesem Tastverhältnis.
6. Verfahren zum Betreiben eines elektronischen Stromwandlers, wobei der Stromwandler durch einen Aufwärtswandler repräsentiert wird, der aufweist:
eine Eingangsfilterstufe ($L_{F,eq}$) mit einer Nenneingangsspannung u_{in} und einem Eingangsstrom i_{in} ;

CH 708 219 B1

einen Schaltwandler (S, D) mit einer Eingangsspannung u und einem Ausgangsstrom i und die mit einem Tastverhältnis d arbeiten;
und eine Ausgangsfilterstufe (C) mit einer Ausgangsspannung u_{out} ;
wobei das Verfahren, um eine konstante Leistungsübertragung durch den Wandler zu erreichen, die Schritte aufweist:
Berechnen, aus einem vorgegebenen Leistungswert P^* und aus einem Messwert der Ausgangsspannung u_{out} und aus einem Messwert des Eingangsstroms i_{in} des Tastverhältnisses, dass es zu $d = P^* / (u_{out} i_{in})$ wird und
Betreiben des Schaltwandlers mit diesem Tastverhältnis.

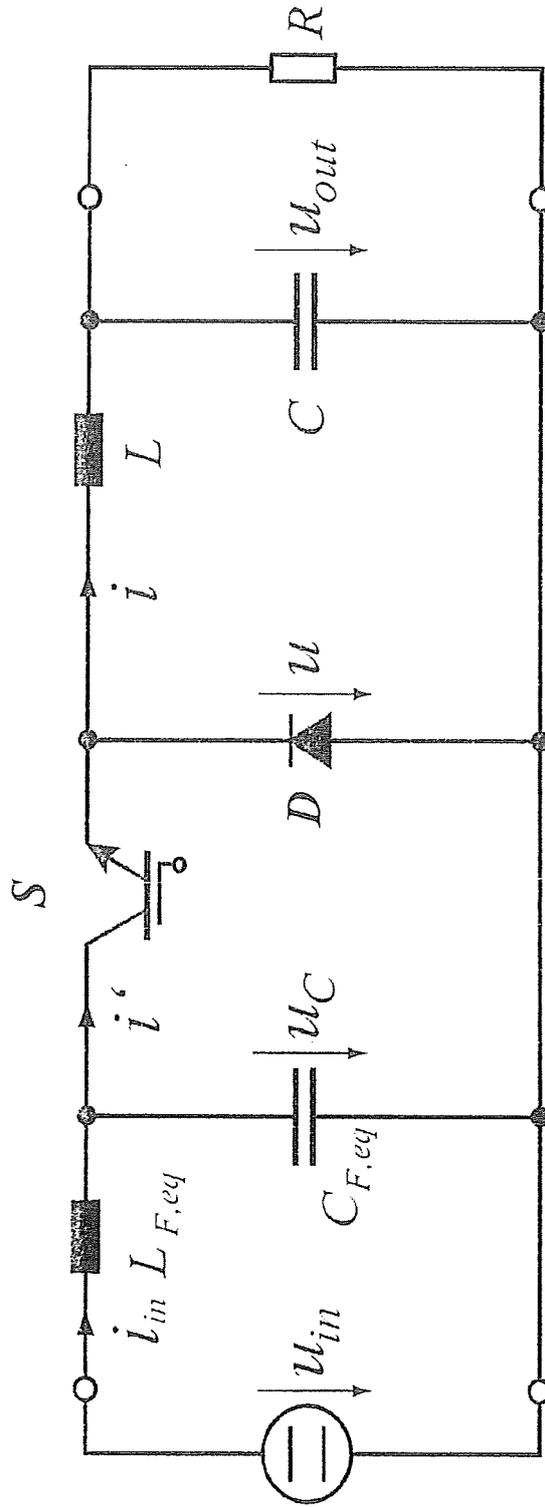


Fig. 1

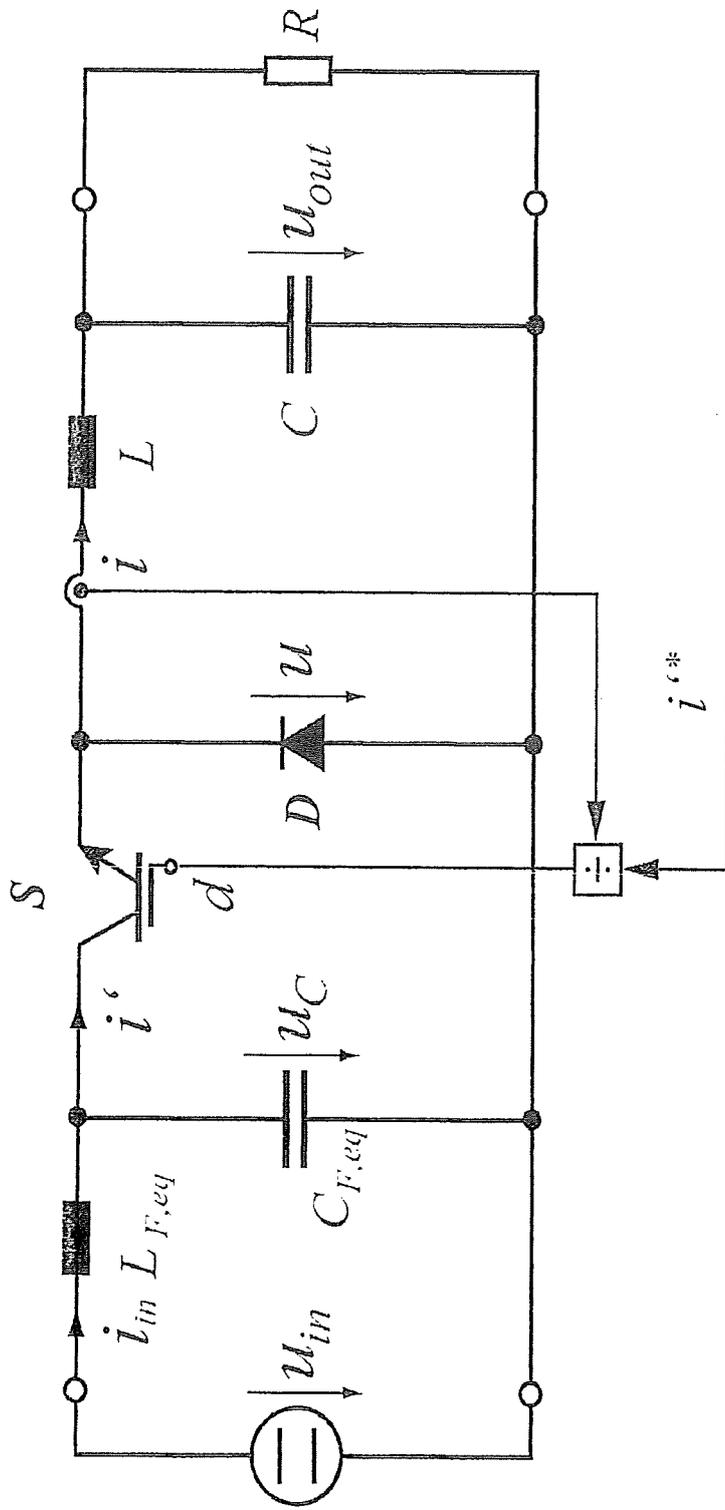


Fig. 2

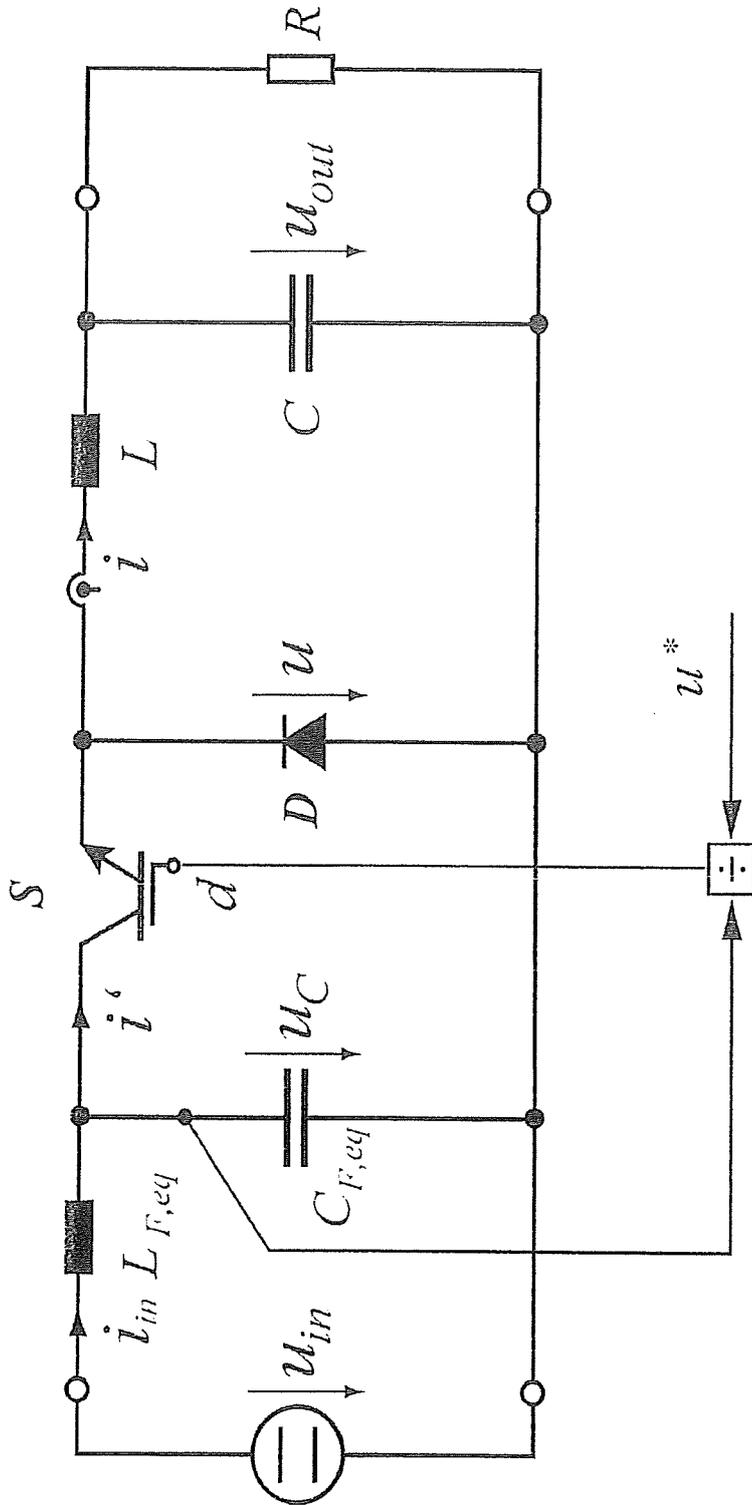


Fig. 3

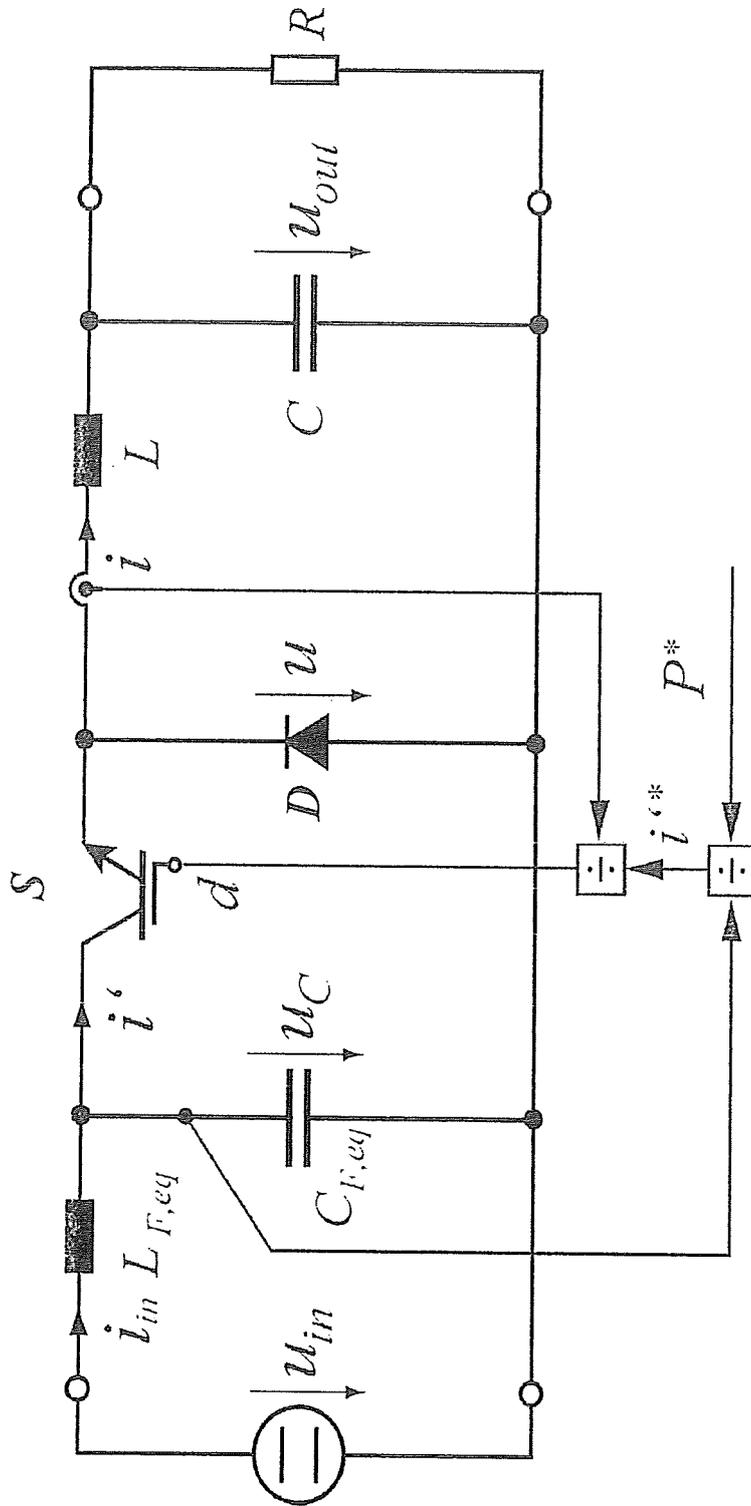


Fig. 4

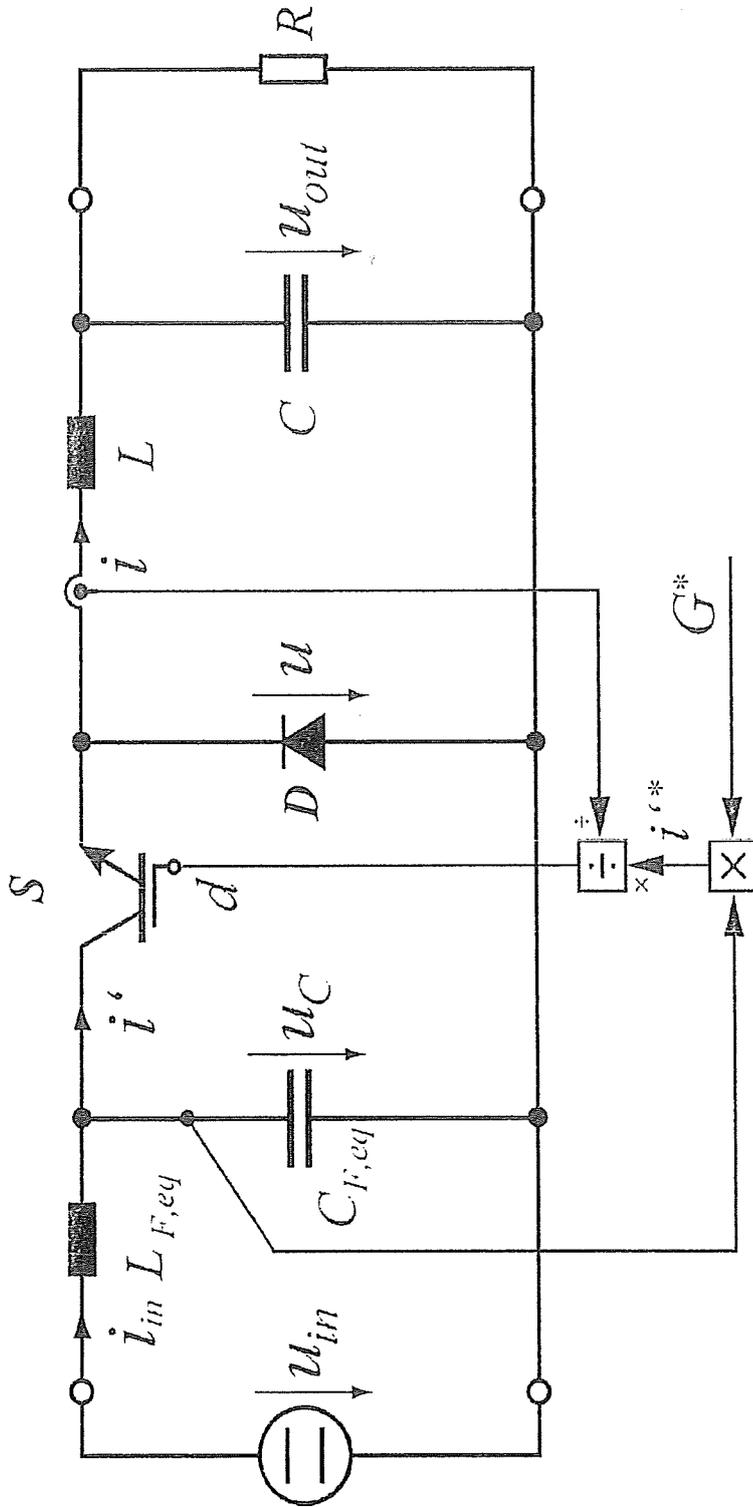


Fig. 5

$$\frac{U_{C0}}{I_0}$$

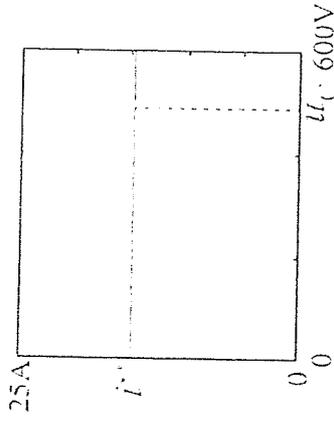
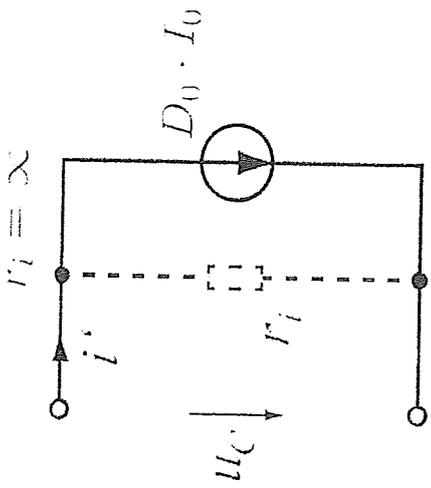
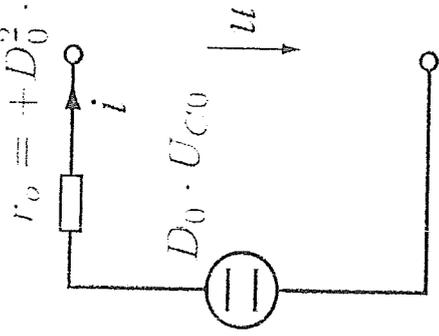


Fig. 6

$$r_i = -\frac{U_{C0}^2}{P}$$

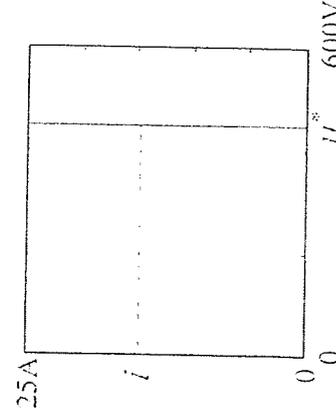
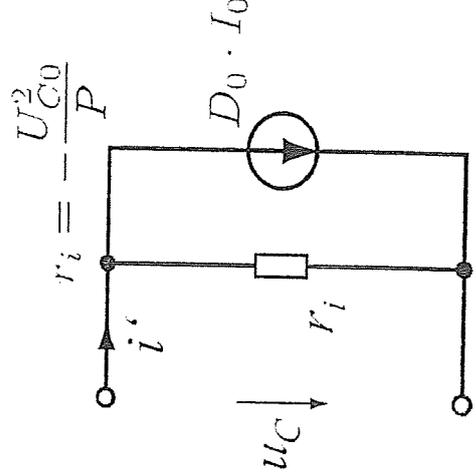
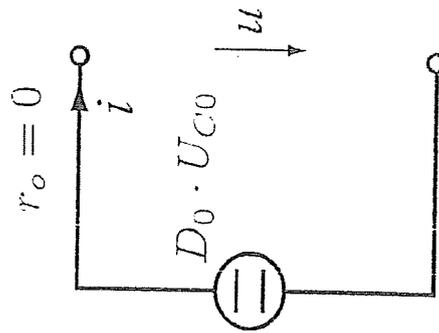


Fig. 7

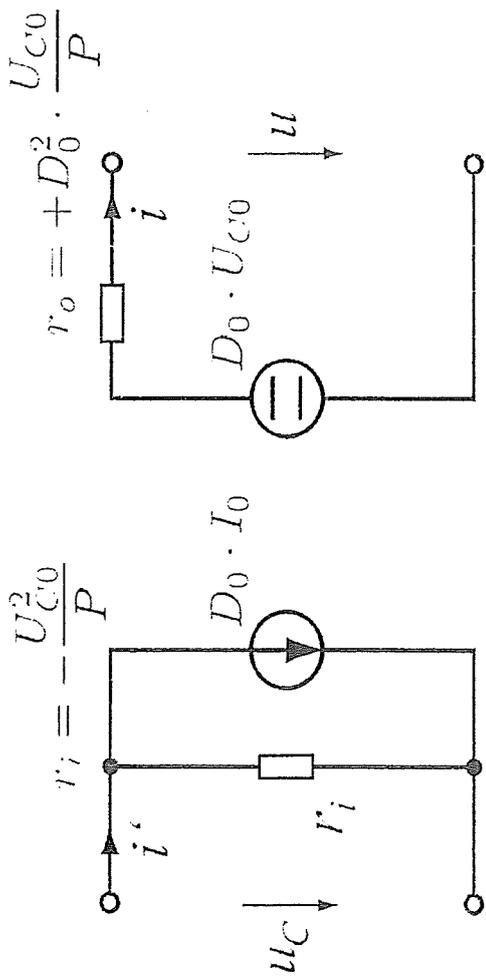


Fig. 8

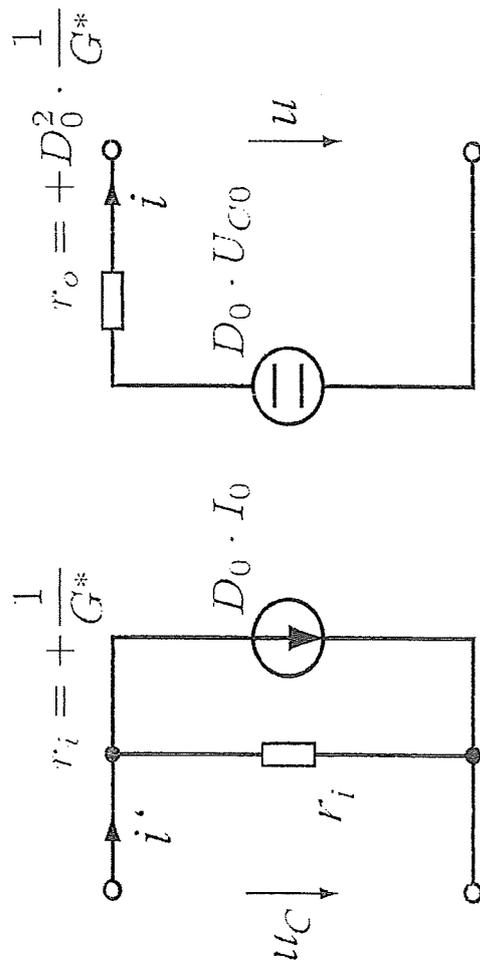
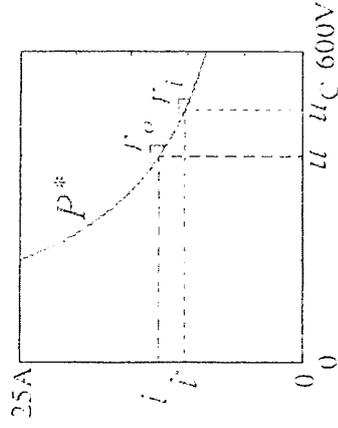
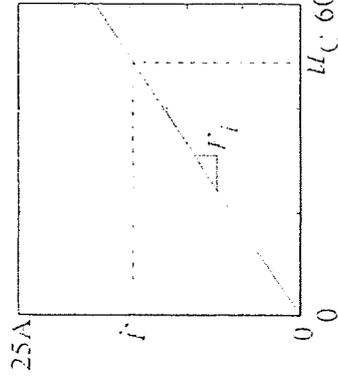


Fig. 9



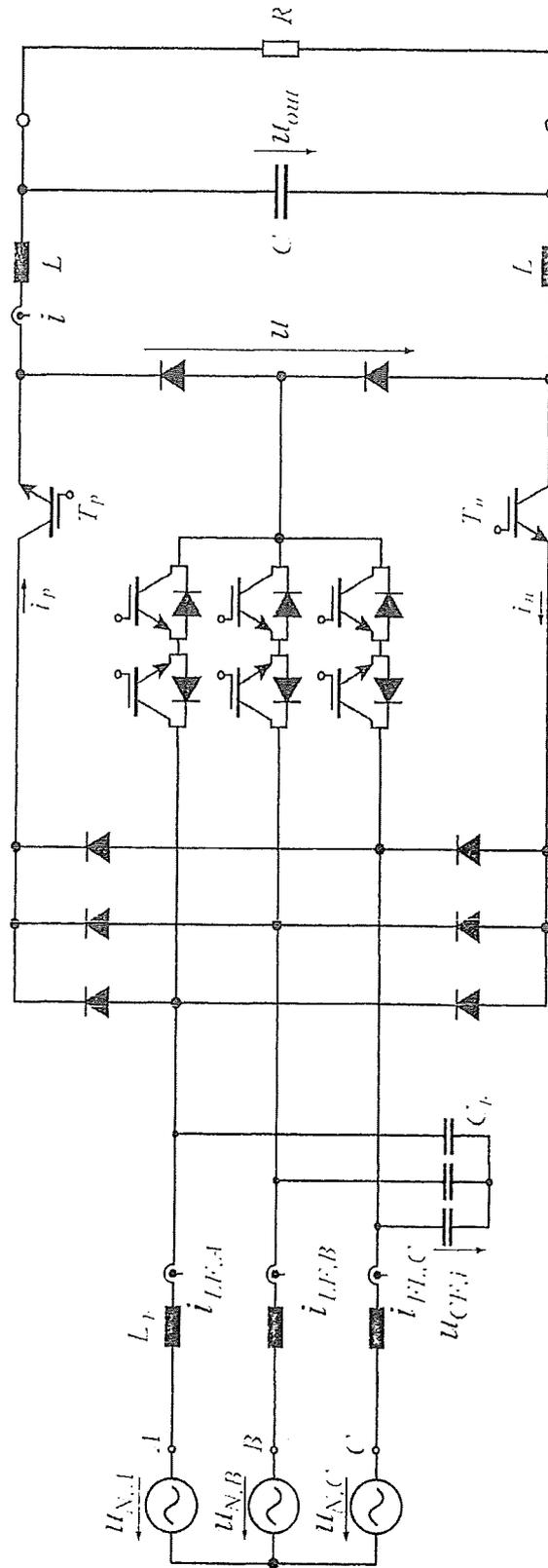


Fig. 10

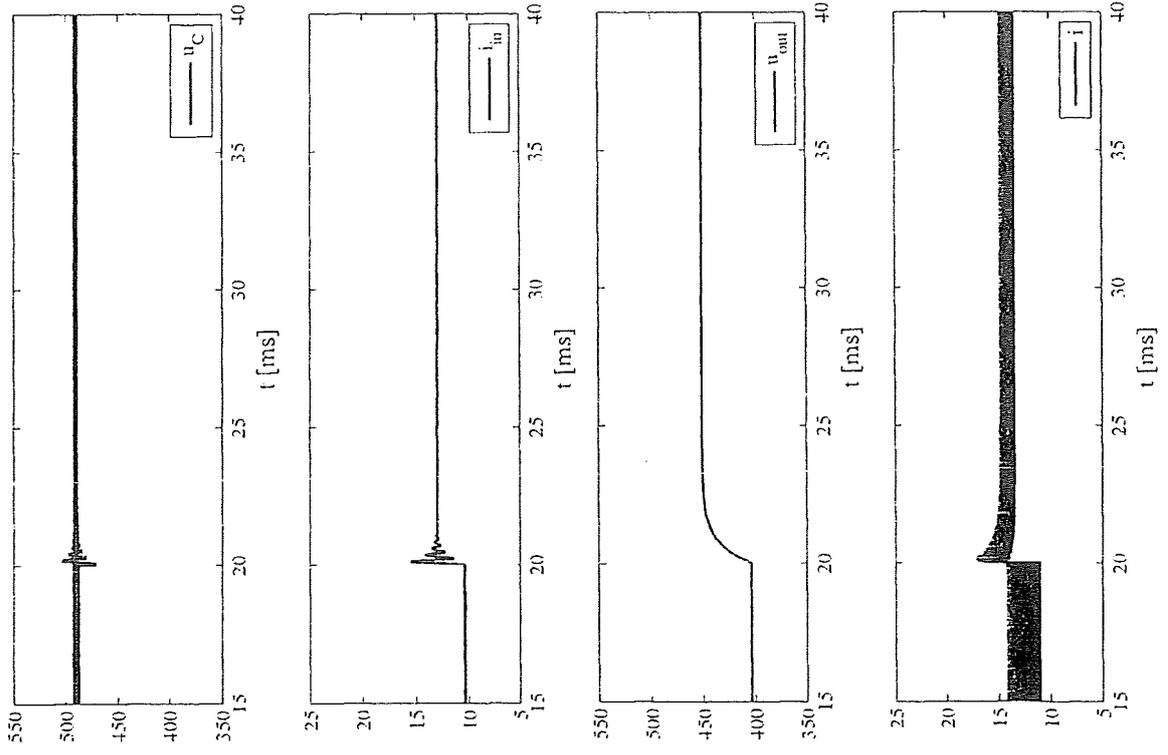


Fig. 11

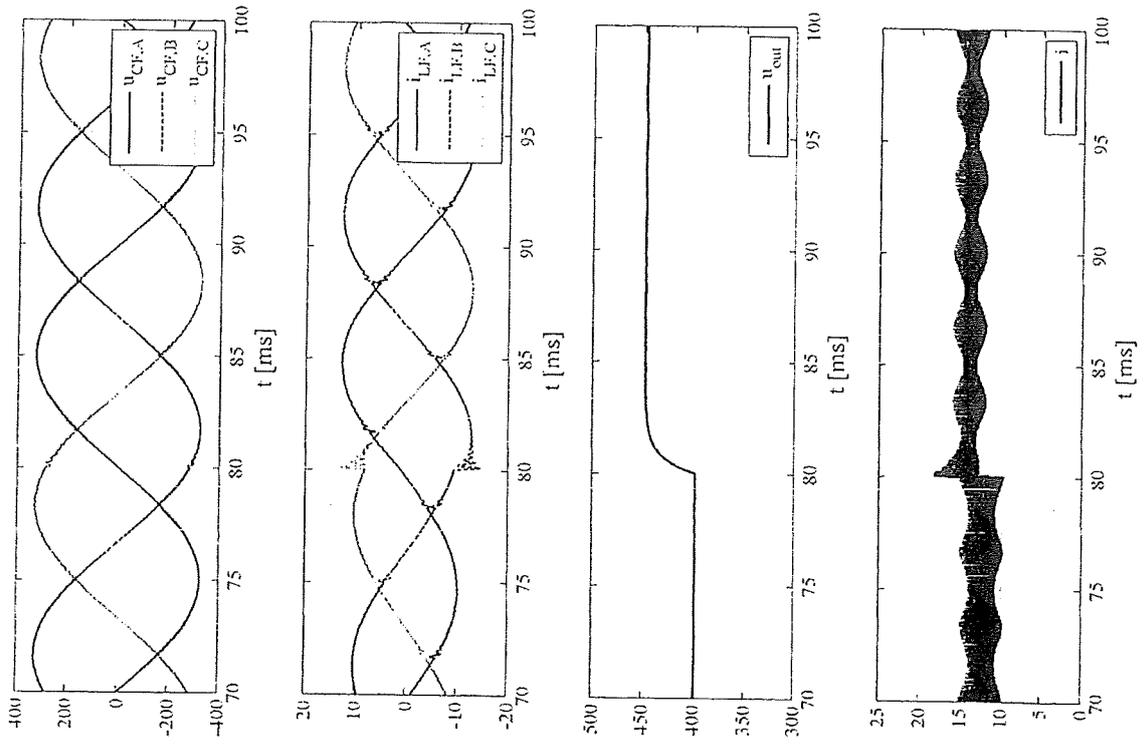


Fig. 12

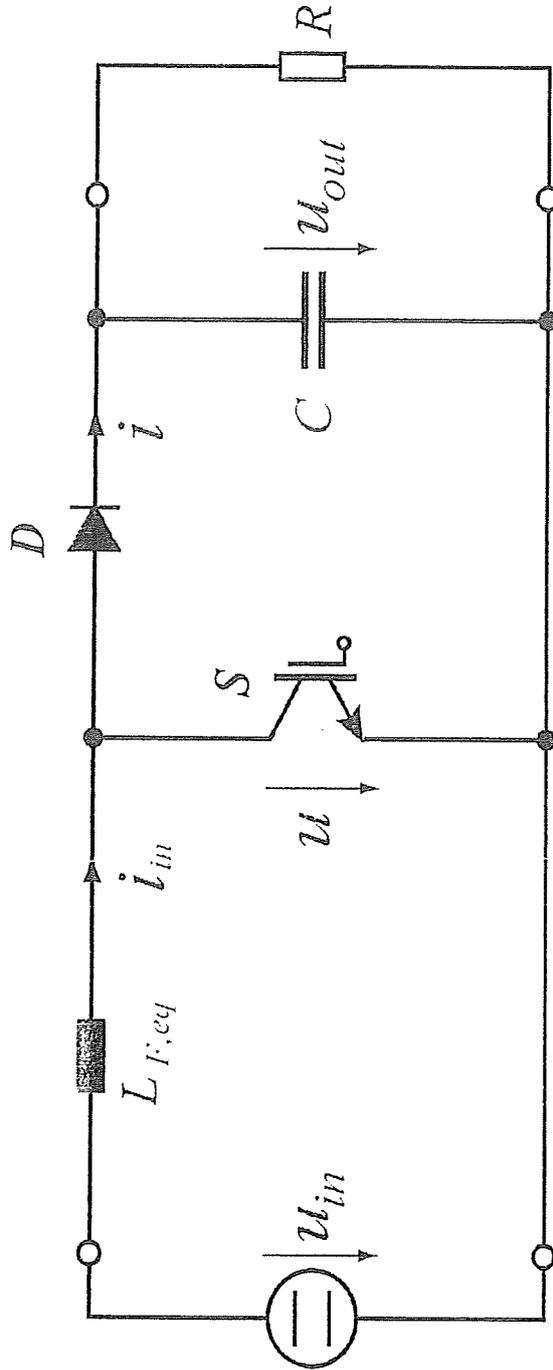


Fig. 13

