⑨【DC-AC 変換器２】　講師：吉野輝雄

TMEiC We drive industry

DC－AC変換器2

講師
東芝三菱電機産業システム㈱
吉野輝雄

講義の概要

アブストラクト

交流フィルタの構成と動作を説明する。マルチレベル変換器（3レベル、MMC）、応用例（太陽光インバータ、UPS）を紹介する。

1 交流フィルタ　PWM波形出力を滑らかにし、正弦波交流出力を得る交流フィルタの構成と動作を説明する。変換器出力にリアクトルがある回路の出力電流の方程式を得る。その方程式から得られる性質を用い、電流波形を作図し、PWM動作の原理を体感する。

2 マルチレベル変換器　マルチレベル変換器として、3レベル変換器、多レベル変換器につき、代表例を紹介する。

3レベル変換器の代表例としては、NPC変換器の構成と動作を簡単に説明する。また、最近、高電圧・大容量の領域で適用が進んでいるモジュラーマルチレベル変換器の構成と動作を説明する。

3 DC-AC変換の応用例　DC-AC変換の応用例として、広く用いられている太陽光インバータ、また、データセンターなどの情報インフラの高信頼電源としてUPSを紹介する。

4 有効電力・無効電力の制御　DC-AC変換の出力する有効・無効電力制御の原理を紹介し、制御回路の概要を紹介する。

5 モータとの電力授受　DC-AC変換器とモータとの間での有効電力の授受について、簡単に紹介する。

TMEiC We drive industry　Page 2

Index

1. 交流フィルタ
2. マルチレベル変換器
3. DC-AC変換器の応用例
4. インバータによる交流連系の基本
5. インバータ制御の基本
6. モータとの電力授受

TMEiC We drive industry　TOSHIBA MITSUBISHI-ELECTRIC INDUSTRIAL SYSTEMS CORPORATION

1. 交流フィルタ

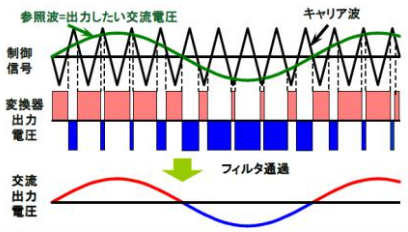
DC－AC変換器の出力には高調波成分が含まれるため、そのままでは、きれいな交流電圧になりません。きれいな交流電圧（正弦波）とするため、交流フィルタが必要です。その構成と原理について学びます。

1.1 リアクトルによる電流波形の円滑化
1.2 リアクトルとコンデンサを組合せたフィルタ

TMEiC We drive industry　Page 4

フィルタによる正弦波への整形

パルス幅変調(PWM)により作られた矩形波をフィルタにより正弦波となるように、波形を整えます。

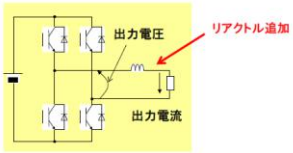


TMEiC We drive industry　Page 5

⑨【DC-AC 変換器２】　講師：吉野輝雄

1.1 リアクトルによる電流波形の円滑化

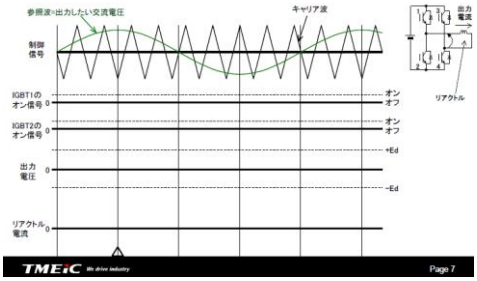
先に、単相インバータに抵抗負荷を接続したシミュレーションを示しました。電流波形も矩形波の集合になりました。
リアクトルは、電流の大きさを一定に保とうとする性質(慣性)があるので、電流波形を滑らかにする作用があります。



TMEiC We drive industry　Page 6

リアクトル負荷の電流波形の作図演習

単相インバータにリアクトルが負荷として接続している場合の電流を作図で求めます。



TMEiC We drive industry　Page 7

電流作図の考え方 1

インバータの動作原理から、電流の作図計算ができます。作図を簡単にするため、負荷はリアクトルだけと仮定します。

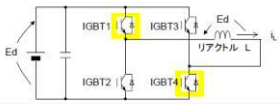
IGBT1がオンの期間、リアクトルが背負う電圧が、直流電圧E_dに等しい。

$$E_d = L\frac{di_L}{dt}$$

これを解くと、電流が直流電圧E_dとインダクタンスLで決まる傾きで増加することが分かる。

$$i_L = \frac{E_d}{L}t + I_0$$

ただし、I_0は、IGBT1がオンする直前に、リアクトルに流れていた電流。



TMEiC We drive industry　Page 8

電流作図の考え方 2

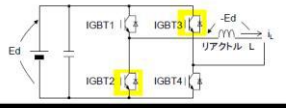
IGBT2がオンの期間は、インダクタンスLにより生じる電圧の極性が逆になる。

$$-E_d = L\frac{di_L}{dt}$$

これを解くと、電流が直流電圧E_dとインダクタンスLで決まる傾きで減少することが分かる。

$$i_L = -\frac{E_d}{L}t + I_0$$

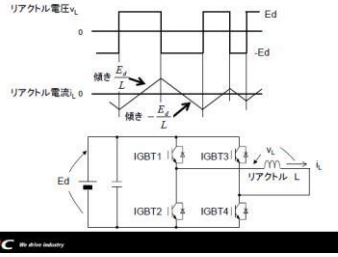
ただし、I_0は、IGBT1がオンする直前に、リアクトルに流れていた電流。



TMEiC We drive industry　Page 9

電流作図の考え方 3

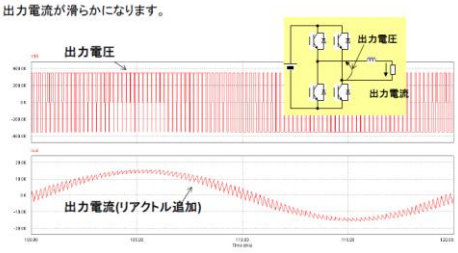
リアクトルの電圧v_Lは、IGBTのオンオフ動作により、矩形波電圧が印加する。
簡単な電圧波形を例に、電流の作図方法を示す。
リアクトルは、矩形波電圧に対し、傾きが一定の折れ線状の電流を流す動作を行う。波形を滑らかにする機能がある。



TMEiC We drive industry　Page 10

リアクトルを出力に追加した波形例

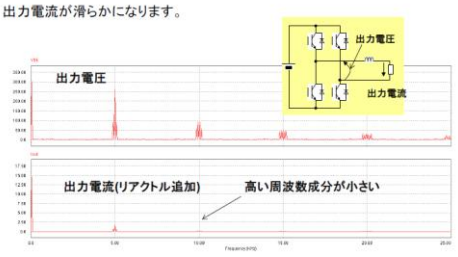
出力電流が滑らかになります。



TMEiC We drive industry　Page 11

リアクトルを出力に追加した波形例

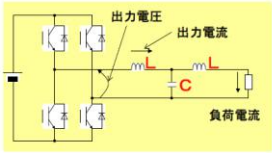
出力電流が滑らかになります。



TMEiC We drive industry　Page 12

1.2 リアクトルとコンデンサを組合せたフィルタ

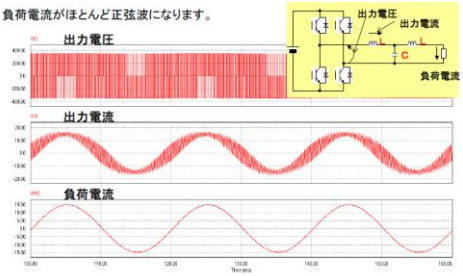
リアクトルにさらに、コンデンサを組合せL－C－LのT型フィルタを使ってみます。



TMEiC We drive industry　Page 13

LCLフィルタを用いた波形例

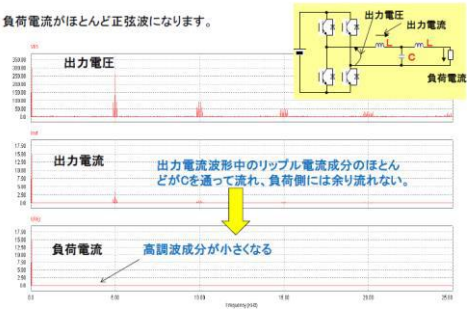
負荷電流がほとんど正弦波になります。



TMEiC We drive industry　Page 14

LCLフィルタを用いた波形例

負荷電流がほとんど正弦波になります。

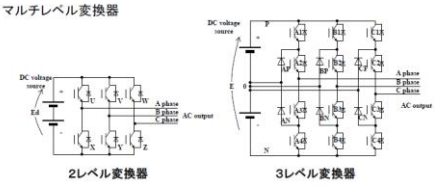


⑨【DC-AC 変換器２】　講師：吉野輝雄

2. マルチレベル変換器

前章では、構成が最も単純な2レベル変換器を通じ、DC－AC変換器の基本を学びました。この章では、マルチレベル変換器について学びます。

2.1 3レベル変換器
2.2 マルチレベル変換器

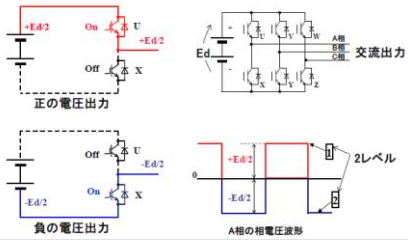


2レベル変換器　3レベル変換器

TMEIC Page 16

2レベル変換器の復習

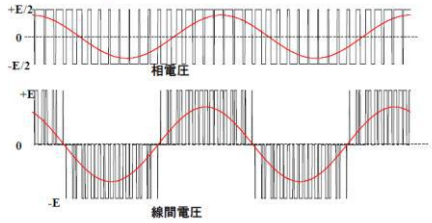
これまで学んだ2レベル変換器の復習をします。
ある一つの相電圧に着目すると、「正」と「負」の2つの電圧レベルを出力するものです。



TMEIC Page 17

2レベルインバータの電圧波形

インバータのレベル数は、相電圧で数えます。
線間電圧のレベル数は、相電圧のレベルをnとすると、2n−1となります。
2レベルインバータの線間電圧は、3レベルになります。

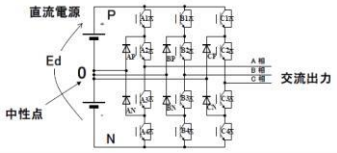


TMEIC Page 18

2.1 3レベル変換器

3レベル変換器の構成方法は、幾つかありますが、ここでは最も代表的な中性点ダイオードクランプ回路による3レベル変換器の回路を紹介します。

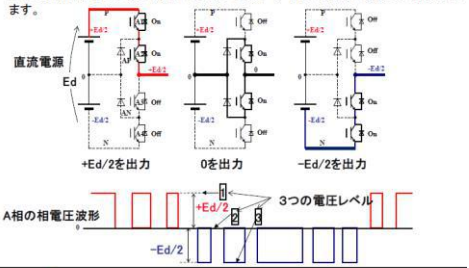
各相には、4つのIGBTが接続されます。さらに、2つのダイオードが接続されます。2レベル変換器に比べ、回路構成が複雑になります。
直流回路には、正電圧母線P、負電圧母線Nに加え、中性点母線0が加わります。



TMEIC Page 19

3レベル変換器の動作

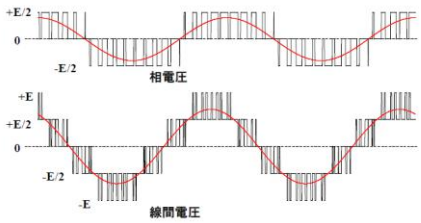
3レベル変換器の動作につき、A相の相電圧を例に説明します。
上2つのIGBTをオンすると＋、下2つをオンすると－、中の2つをオンすると0が出力されます。



TMEIC Page 20

3レベル変換器の動作

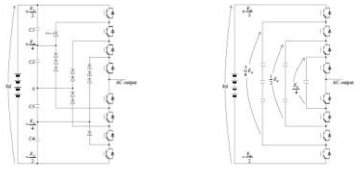
3レベル変換器では、相電圧が3レベルになるので、線間電圧では5レベルになります。



TMEiC We drive industry　Page 21

2.2 マルチレベル変換器

レベル数が4以上多数あるマルチレベル変換器があります。下に、1相当たりの回路図の例を示します。

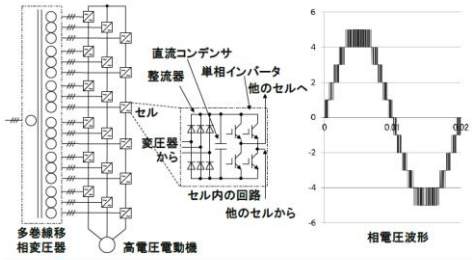


ダイオードクランプ回路による5レベル変換器　　フライイングキャパシタを用いた5レベル変換器

TMEiC We drive industry　Page 22

マルチセル構成による高電圧インバータの例

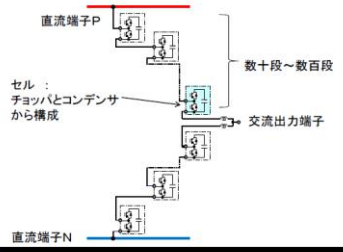
単相インバータを多段構成したマルチレベル変換器で、高電圧を出力する構成例とその出力波形例を示します。出力波形のレベル数が多くなり、正弦波に近づくことが分かります。



TMEiC We drive industry　Page 23

MMC　モジュラーマルチレベル変換器

最近、直流送電などに適用が増えてきたMMC変換器の1相分の構成を示します。
チョッパから構成されたセルを多段に接続し、変換器を構成します。
MMC: Modular Multilevel Converter



TMEiC We drive industry　Page 24

3. DC-AC変換器の応用例

DC－AC変換器の応用例の内、次の2つについて学びます。

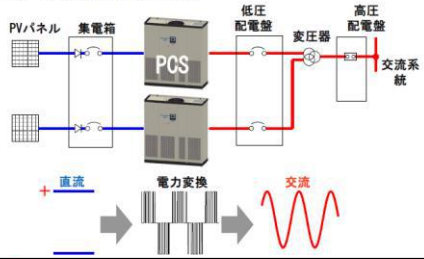
3.1 太陽光インバータ
3.2 UPS(無停電電源システム)

TMEiC We drive industry　Page 25

⑨【DC-AC 変換器２】　講師：吉野輝雄

3.1 太陽光インバータ

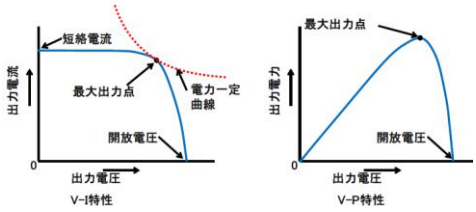
近年、導入が著しい太陽光発電のインバータは、太陽光パネルが発電した直流電力を交流に変換するDC/AC変換を行っています。太陽光インバータを含む変換システムはPCSと呼ばれることが多いです。　PCS:Power Conditioning System



TMEiC　Page 26

太陽光発電の特徴

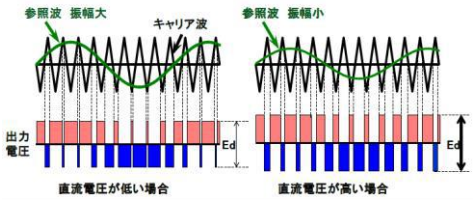
太陽光パネルの発電特性を考慮し、最大の電力が出力できる電圧・電流で運転します。したがって、直流電圧が変動します。



TMEiC　Page 27

交流電圧制御

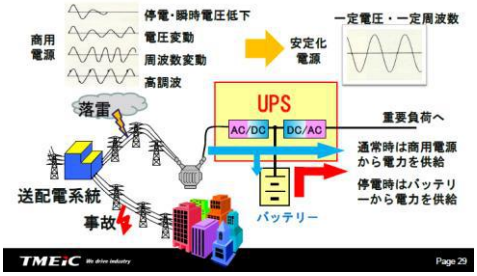
インバータの交流出力電圧は、直流電圧に比例することを学びました。
直流電圧が変動する場合、交流出力電圧を一定にするには、参照信号の振幅を調整します。



TMEiC　Page 28

3.2 UPS(無停電電源システム)

商用電源の状況によらず、通信設備・サーバーなどに、一定周波数・一定電圧の安定な電源を供給します。　UPS：Uninterruptible Power System



TMEiC　Page 29

4. インバータによる交流連系の基本

まず、インバータの電力について学びます。次に、インバータを交流連系する際に必要な知識として、インバータの交流出力電力の制御原理を学びます。

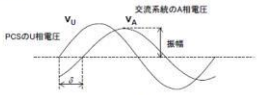
4.1 有効電力の制御原理
4.2 無効電力の制御原理
4.3 4象限運転
4.4 交流系統との連系

TMEiC　Page 30

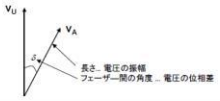
⑨【DC-AC 変換器２】　講師：吉野輝雄

フェーザの基礎

平衡状態にある三相電力系統では、交流系統電圧とPCSの電圧については、ある相を代表にとって表すことができる。ここでは、PCSのU相と交流系統電圧のA相を代表相として説明する。



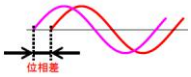
さらに、この関係はフェーザー(ベクトル)で表すことができる。

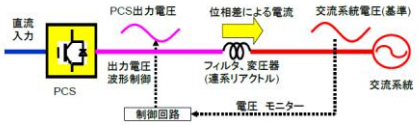


TMEiC We drive industry　Page 31

4.1 有効電力の制御原理

有効電力の制御原理を説明します。
- 交流系統電圧に対するPCS出力電圧の位相差を調整して制御します。
- 位相差を大きくすると有効電力は大きくなります。

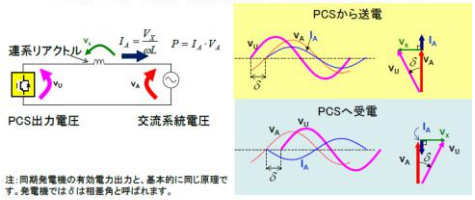




TMEiC We drive industry　Page 32

有効電力の制御原理

PCSの動作を、フェーザ図で説明します。PCS出力電圧と交流系統電圧の位相差が矢印の方向のずれで示されます。
- PCS出力電圧が進む方向に位相差を制御すると、有効電力Pを送電します。
- PCS出力電圧が遅れる方向に位相差を制御すると、有効電力Pを受電します。

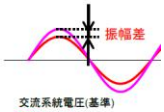


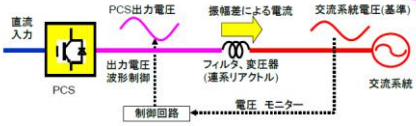
注：同期発電機の有効電力出力と、基本的に同じ原理です。発電機ではδは相差角と呼ばれます。

TMEiC We drive industry　Page 33

4.2 無効電力の制御原理

PCSの無効電力の制御原理を説明します。
- 交流系統電圧と変換器出力電圧の振幅の差を調整して制御します。
- 振幅の差を大きくすると、無効電力は大きくなります。

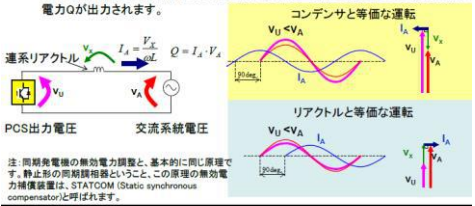




TMEiC We drive industry　Page 34

無効電力の制御原理

PCS出力電圧と交流系統電圧の振幅差が矢印の長さのずれで示されます。
- PCS出力電圧を交流系統電圧より大きくすると、コンデンサが接続したと等価な無効電力Qが出力されます。
- PCS出力電圧を交流系統電圧より大きくすると、リアクトルが接続したと等価な無効電力Qが出力されます。



注：同期発電機の無効電力調整と、基本的に同じ原理です。静止形の同期調相器ということ、この原理の無効電力補償装置は、STATCOM (Static synchronous compensator)と呼ばれます。

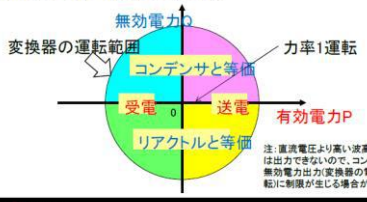
TMEiC We drive industry　Page 35

⑨【DC-AC 変換器２】　講師：吉野輝雄

4.3 四象限運転

PWM変換器の運転についてまとめます。

- 電圧の位相と振幅を同時に制御すれば、有効電力P・無効電力Qが同時に制御されます。
- PとQを座標軸とした系の四象限で、運転することになります。
- 力率1とするには、Q=0(横軸上)で運転します。



注：直流電圧より高い波高値の交流電圧は出力できないので、コンデンサと等価な無効電力出力(変換器の電圧の高め運転)に制限が生じる場合があります。

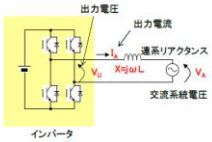
TMEiC We drive industry　Page 36

4.4 交流系統との連系

交流系統との有効電力、無効電力のやり取りについて、演習を通じ理解を深めます。

検討を簡単にするため、次の仮定をします。

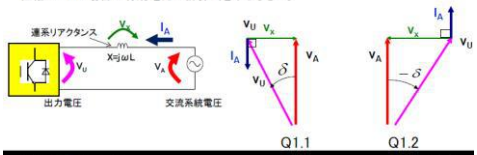
- DC/AC変換器と交流系統の電圧源が、連系リアクタンスX(=jωL)を介して、接続している構成とします。
- また、インバータの出力電圧は、基本波成分だけを考えます。



TMEiC We drive industry　Page 37

演習1 有効電力の計算

Q1.1
インバータの出力電圧V_U、交流系統電圧V_A、その間の連系リアクタンス(フィルタや変圧器のリアクタンス)をX、インバータの出力電圧の位相をδとしたとき、インバータが出力する有効電力の計算式を示しなさい。交流系統出力点での力率は1とします。
(ヒント：フェーザー(ベクトル)図、三角関数)
Q1.2
位相が$-\delta$の場合の有効電力の計算式を示しなさい。

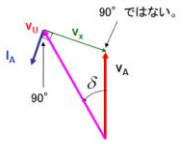


TMEiC We drive industry　Page 38

有効電力の計算

有効電力の計算式は、力率が1でなくても(フェーザーが直角三角形を構成しない場合も)同じ式となる。

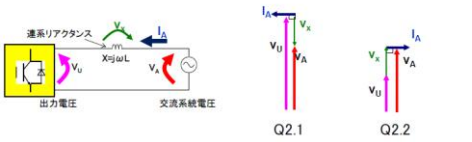
$$P = \frac{V_A V_U}{X} \sin\delta$$



TMEiC We drive industry　Page 39

演習2 無効電力の計算

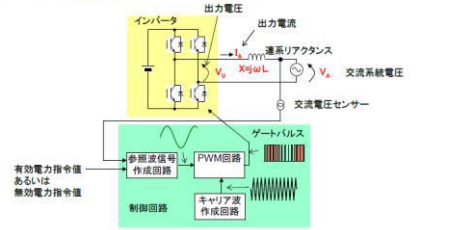
Q2.1
インバータの出力電圧V_U、交流系統電圧V_A、その間の連系リアクタンス(フィルタや変圧器のリアクタンス)をXとし、V_UとV_Aが同相で、V_Uが大きい場合の無効電力を計算式を示しなさい。
Q2.2
V_Uが小さい場合の無効電力の計算式を示しなさい。



TMEiC We drive industry　Page 40

5. インバータ制御の基本

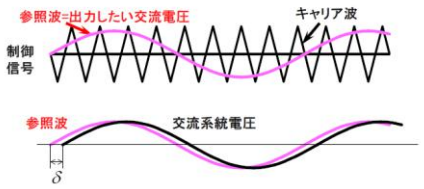
簡単な制御回路を想定し、インバータの有効・無効電力の制御の基本を学びます。参照波の作り方がポイントとなります。



TMEiC We drive industry　Page 41

インバータ内の制御の動きの復習

インバータから系統へ有効電力を出力したい場合、参照波として交流系統電圧に対して、フェーザ図のように位相差δ進めた正弦波を作ってPWM制御を行う。

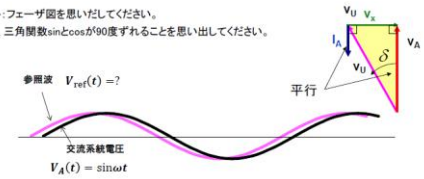


TMEiC We drive industry　Page 42

演習3　有効電力出力時の参照波

有効電力を出力するため、交流電圧に平行な振幅1の電流を出力したい。
交流系統電圧$V_A(t)$の振幅は1.0で、正弦波sinωtで表されるとします。交流系統電圧は、電圧センサーで制御回路に取り込まれます。定格電圧の時に振幅が1.0となるよう制御演算の中で調整されるものとします。
連系リアクタンスをXとして、参照波を三角関数の計算式で示しなさい。

ヒント：フェーザ図を思いだしてください。
また、三角関数sinとcosが90度ずれることを思い出してください。

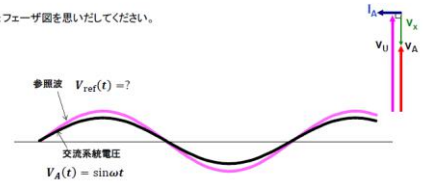


TMEiC We drive industry　Page 43

演習4　無効電力出力時の参照波

容量製の無効電力を出力するため、交流電圧と直行する振幅1の電流を出力したい。
交流系統電圧$V_A(t)$の振幅は1.0で、正弦波sinωtで表されるとします。交流系統電圧は、電圧センサーで制御回路に取り込まれます。定格電圧の時に振幅が1.0となるよう制御演算の中で調整されるものとします。
連系リアクタンスをXとして、参照波を三角関数の計算式で示しなさい。

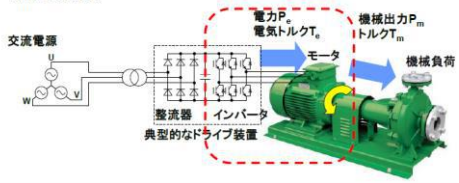
ヒント：フェーザ図を思いだしてください。



TMEiC We drive industry　Page 44

6　モータとの電力授受

- インバータとモータ(電動機)が授受する電力は、交流系統の動きと同じである。
- ただし、モータの場合、交流電圧の周波数、電圧が変化する点が異なる。

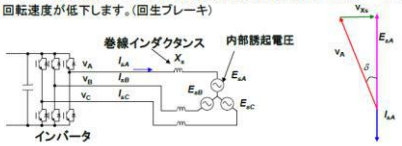


TMEiC We drive industry　Page 45

⑨【DC-AC 変換器２】　講師：吉野輝雄

同期電動機の概略等価回路と電力授受

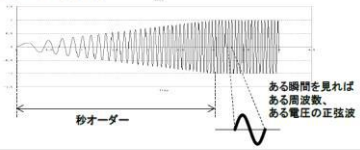
- 同期電動機の等価回路は、概略、電圧源とインピーダンスで表すことができます。正確な等価回路は、電動機のテキストなどで確認してください。
- 交流系統への有効電力の出力の場合と同様、インバータの電圧位相が同期電動機の内部誘起電圧位相より進むと、インバータから同期電動機に有効電力が与えられます。負荷の消費する有効電力(機械出力)より大きければ加速します。
- 同期電動機の誘起電圧よりインバータ電圧の位相を遅らせると、同期電動機から有効電力がインバータに送られ、「回生」が行われます。つまり、同期電動機からインバータに有効電力が与えられ、同期電動機と機械負荷の回転エネルギーが減少し、回転速度が低下します。(回生ブレーキ)



TMEiC We drive industry　Page 46

同期電動機の制御

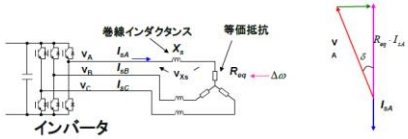
- 同期電動機の電圧とインピーダンスが分かれば、加速に必要な有効電力をインバータから出力するための参照波を計算して作ることができます。
- しかし、次のようなことから、前の章で学んだものより、複雑な制御となります。詳細は、モータドライブの講義を参照ください。
  - 同期電動機の誘起電圧は直接測定できないので、推定して制御する。
  - 電圧の周波数ωが回転数に比例して変化するので、参照波の計算も周波数ωを回転数に応じて変える。

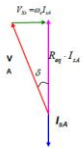


TMEiC We drive industry　Page 47

誘導電動機の概略等価回路

- 誘導電動機の場合、概略の等価回路は、LR負荷と同様になります。正確な等価回路は、電動機のテキストなどで確認してください。
- 等価抵抗で消費される電力は、機械出力と電動機内部損失の和となります。
- 等価抵抗は、電動機の回転数などの状態により変化します。
- 誘導電動機には、電圧と周波数が比例して変化する特性があるので、最も簡単な制御方法として、電圧/周波数(V/f)の比を一定に保ち、インバータの出力電圧と周波数を増減する方法があります。



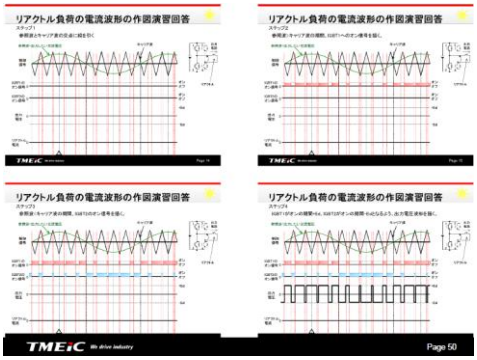
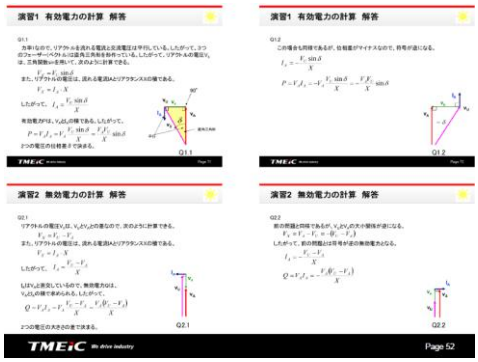


TMEiC We drive industry　Page 48

TMEiC
We drive industry

Thank you

TOSHIBA MITSUBISHI-ELECTRIC INDUSTRIAL SYSTEMS CORPORATION



⑨【DC-AC 変換器２】　講師：吉野輝雄