メーカーのための

三相電圧不平衡率とは？

EN/IEC 60204-1 で要求される 2%を超えない電圧不平衡率の理解

本稿は、技術的な内容を説明していますが、理解の一助となることを考慮して作成されたものです。 あくまで参考情報として扱う必要があります。利用者あるいは第 3 者に損害やトラブルが発生しても、当社は損害賠償その他一切の責任を負いません。 本稿の内容を鵜呑みにしないで、必ず個社・個人の責任においてご判断ください。

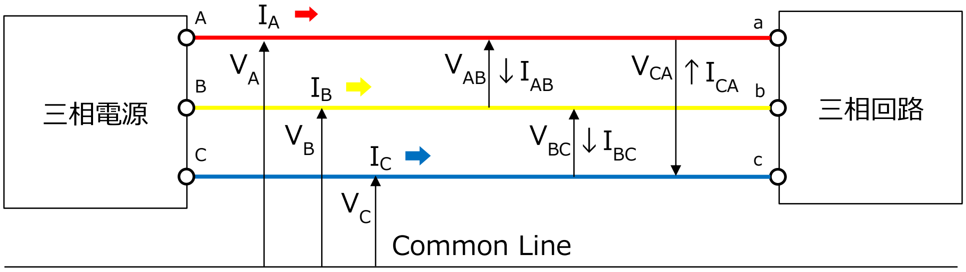
本稿の内容については、一部を除き、その大部分は、専門書やインターネット等でわかりやすく、詳しい内容が記載されています。本稿の内容を難しいと感じられる場合は、それらを参照することをお勧めします。

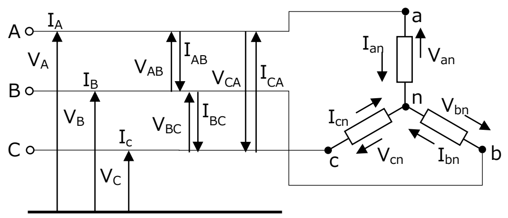
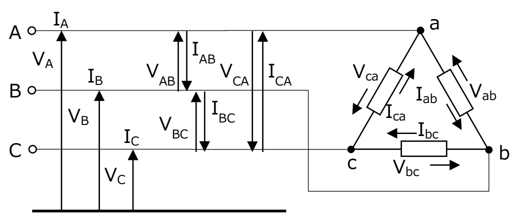
本稿は、体系的に全体を理解することによって、読者が応用できるようになることを目標としています。そのため、自明であると考えられる内容も敢えて同じような説明を繰り返しています。一般的な解説等では、「同様である」として割愛されている内容も、“同様に” 記述しています。このために冗長であると感じられる部分を多く含みますが、予めご承知おきください。

三相交流回路、三相交流電源の基礎概念

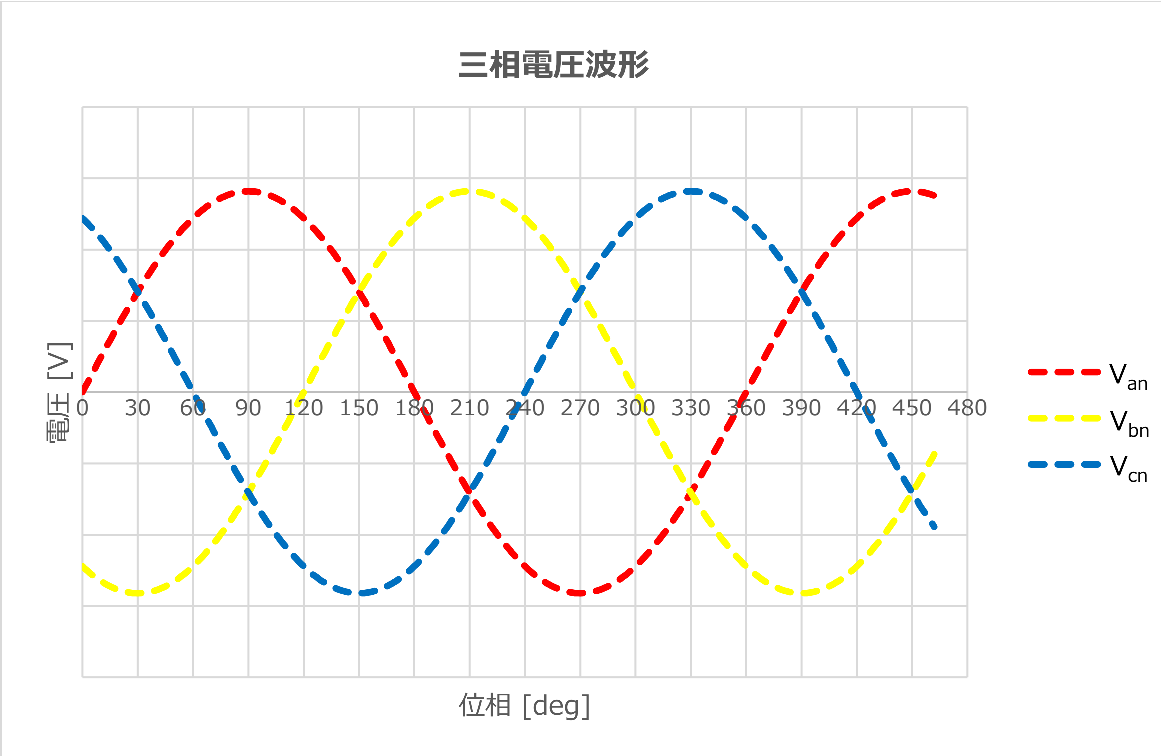
定義（記号の用法）

本稿では、以下のように記号を定義します。



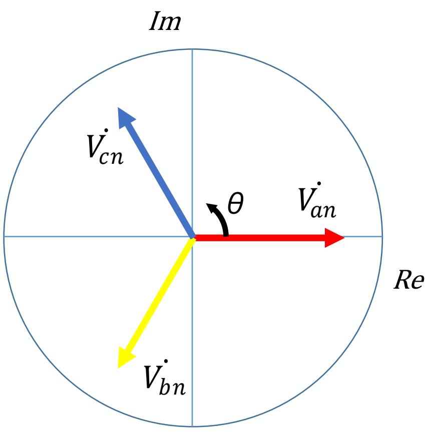
<table>
<tr><td colspan="2">端子電圧（対コモン） $\dot{V}_A$、$\dot{V}_B$、$\dot{V}_C$　　Line Voltage：線間電圧 $\dot{V}_{AB}$、$\dot{V}_{BC}$、$\dot{V}_{CA}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">Line Current：線電流 $\dot{I}_A$、$\dot{I}_B$、$\dot{I}_C$　　端子間電流 $\dot{I}_{AB}$、$\dot{I}_{BC}$、$\dot{I}_{CA}$</td></tr>
<tr><th>Y 回路（Y connection, star connection)</th><th>Δ回路（delta connection, ring connection)</th></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Line Voltage：線間電圧
$\dot{V}_{AB}$、$\dot{V}_{BC}$、$\dot{V}_{CA}$</td><td rowspan="2">Line Voltage：線間電圧＝Phase Voltage：相電圧
$(\dot{V}_{AB}、\dot{V}_{BC}、\dot{V}_{CA}) = (\dot{V}_{ab}、\dot{V}_{bc}、\dot{V}_{ca})$</td></tr>
<tr><td>Phase Voltage：相電圧
$\dot{V}_{an}$、$\dot{V}_{bn}$、$\dot{V}_{cn}$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Line Current：線電流＝Phase Current：相電流
$(\dot{I}_A、\dot{I}_B、\dot{I}_C) = (\dot{I}_{an}、\dot{I}_{bn}、\dot{I}_{cn})$</td><td>Line Current：線電流
$\dot{I}_A$、$\dot{I}_B$、$\dot{I}_C$</td></tr>
<tr><td>Phase Current：相電流
$\dot{I}_{ab}$、$\dot{I}_{bc}$、$\dot{I}_{ca}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">端子電圧（対コモン）（$\dot{V}_A$、$\dot{V}_B$、$\dot{V}_C$）ならびに、端子間電流（$\dot{I}_{AB}$、$\dot{I}_{BC}$、$\dot{I}_{CA}$）は、区別の為に表示しています。
記号の上のドットはベクトルを表します。</td></tr>
</table>

三相波形



フェーザ表示（phasor）

正弦波を複素数で表現する表示方法であり、複素平面上でベクトルとして表現できます。



	波形表示	フェーザ表示
	$V_{an} = \|V_{an}\| \sin(\omega t + \theta_a)$ $V_{bn} = \|V_{bn}\| \sin(\omega t + \theta_b)$ $V_{cn} = \|V_{cn}\| \sin(\omega t + \theta_c)$	$\dot{V}_{an} \leftrightarrow \|V_{an}\| e^{j\theta_a} = \|V_{an}\|(\cos\theta_a + j\sin\theta_a)$ $\dot{V}_{bn} \leftrightarrow \|V_{bn}\| e^{j\theta_b} = \|V_{bn}\|(\cos\theta_b + j\sin\theta_b)$ $\dot{V}_{cn} \leftrightarrow \|V_{cn}\| e^{j\theta_c} = \|V_{cn}\|(\cos\theta_c + j\sin\theta_c)$
|V|	波高値	ベクトルの長さ
θ	位相	ベクトルの角度
ω	角周波数 $\omega = 2\pi f$	オイラーの公式･･･ $e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$
	f :周波数	

位相は、相対関係を表しているのみであり、波形上、どの相を基準にするかは任意に決定してよい。

製品に接続・供給される電圧がいつでも平衡していると考えてはならない

三相回路において、各相の電圧が等しく、互いの位相差が正確に１２０度ずれているとき、三相の電圧が「平衡している」状態であり、その対称性を前提にして様々に計算することはさほど難しいことではありません。

しかし現実には様々な要因によって、各相の電圧・位相は理想的にはならず、多かれ少なかれ不平衡状態となっていることが通常です。僅かな不平衡は通常問題ありません。しかし一方で、極端な不平衡状態では、電気機器が正常に動作しないことは当然として考えられます。

そこで、規格書 EN/IEC 60204-1 では、少しの不平衡状態であっても、電気機器は正常に動作しなければならず、それがどの程度までの不平衡状態であるかが記載されています。

> **規格書 EN IEC 60204-1（4.3.2 AC supplies）**
>
> **Voltage unbalance**
>
> Neither the voltage of the negative sequence component nor the voltage of the zero sequence component in three-phase supplies exceeding 2 % of the positive sequence component.
>
> 相バランスが常に理想的な状態ではないことを前提として、ここに記述されている条件内（三相電源の逆相成分の電圧も零相成分の電圧も、正相成分の 2%を超えない）で装置は安全かつ適切に動作するよう設計されていなければならない。

規格書 EN IEC 60204-1 においては、唐突に逆相成分、零相成分、正相成分という言葉が登場し、特に説明はありません。他に関連する説明や要件もありません。

逆相成分、零相成分、正相成分といった言葉は、三相交流理論での対称座標法の用語です。広く一般的に知られています。これらをわかりやすく丁寧に解説する記事はインターネット上に多く存在し、無料閲覧できるものもあります。

不平衡状態を評価しようと電圧・電流・位相を並べても、１つの相の電圧・電流または位相のずれによって、三相の中性点がシフトして他の相に影響するため、複雑です。不平衡状態の全体を同時に捉え、定量的に評価する指標が必要です。

設備不平衡率とは異なります。本稿では詳細に触れません。

> 設備不平衡率（内線規程、JEAC8001：屋内配線工事等、日本において広く利用され、実績ある代表的な民間自主規格）
>
> $$\text{設備不平衡率} = \frac{\text{各線間に接続される単相負荷設備容量の最大最小の差}}{\text{総負荷設備容量の }1/3} \times 100$$

発電機に接続する場合、設備（負荷）不平衡率については、その発電機の仕様内で用いる必要があります。

不平衡率	**：対称座標法によって得られる３相の不平衡度合いを表す指標**
設備不平衡率	**：３相において単相負荷を適切に配置するための負荷の偏りの度合いを表す指標**

対称座標法

誤解を恐れず、できるだけわかりやすいイメージで対象座標法を説明するならば、

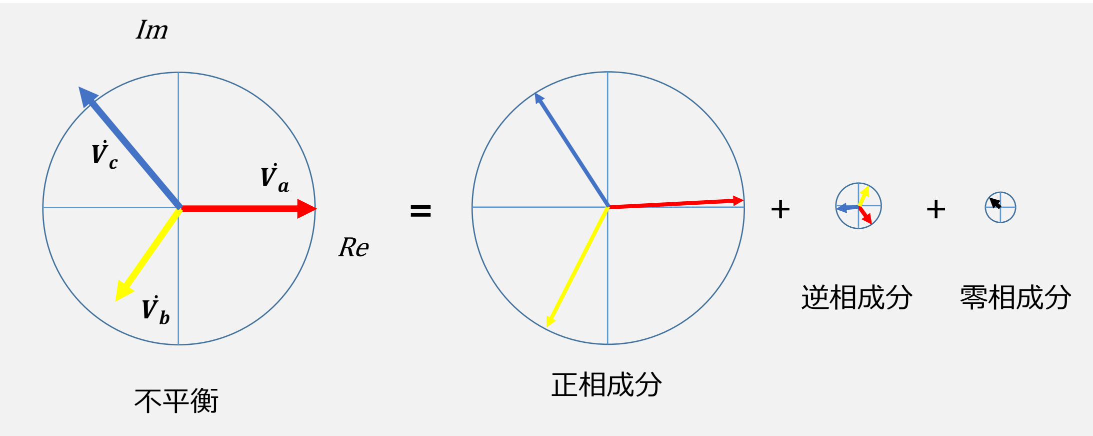
3 相不平衡の電圧（または電流）を次の 3 つの成分に分解します。

- 本来の理想からのエラー分で、3 相に共通するエラー分 ➡ 零相成分
- 本来の理想からのエラー分で、各相に逆相順の成分として共通するエラー分 ➡ 逆相成分
- 本来の理想からのエラー分によって理想に届いていない、3 相の大きさが同じで位相差が 120°の成分 ➡ 正相成分

これらすべて、複素平面上のベクトルとして計算します。実際の回路に現れる値ではなく、測定することはできません。

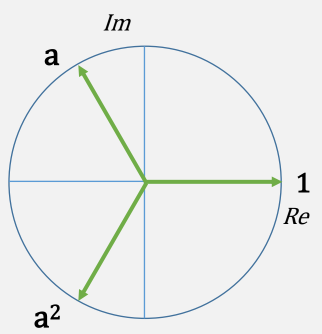
> **逆相成分÷正相成分＜2%、零相成分÷正相成分＜２%**のときに、
> 装置は安全かつ適切に動作するよう設計されていなければならない。
> EN IEC 60204-1 Cl.4.3.2 AC Supplies

正相成分、逆相成分、零相成分を足し合わせることにより、元の不平衡状態を再現します。



位相回転演算子 a について

ベクトルの位相を 120°回転させるための演算子として、“a” が用いられます。



$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot 120^\circ \text{ 回転}$$

$$a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot 240^\circ \text{ 回転}$$

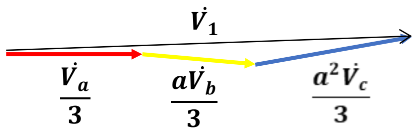
$$a^3 = 1$$

$$a + a^2 + a^3 = 0$$

A を 1 回掛ける度に、大きさは変わらず、位相は 120° 進みます。

以下、三相“電圧”として記述していますが、“電流”でも同様です。

正相成分

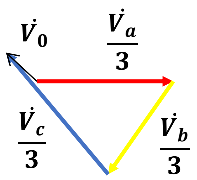


$$\dot{V}_1 = \frac{1}{3}\left(\dot{V}_a + a\dot{V}_b + a^2\dot{V}_c\right)$$

$\dot{V}_b$ を 120°回転させ、$\dot{V}_c$ を 240°回転させて加算します。平衡であれば、同じ向きのベクトルが一直線に並ぶ図になります。

平衡している場合、正相電圧＝三相電圧となります。

零相成分



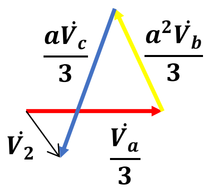
$$\dot{V}_0 = \frac{1}{3}\left(\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c\right)$$

三相をそのまま加算します。平衡であれば、上図は正三角形となり、零相成分 V_0 は 0 となります。不平衡であっても、加算した結果、始点に戻る（つまり閉じられた三角形を描く）場合には、零相成分 V_0 は 0 となります。

Δ回路の場合には、それぞれの始点はそれぞれの終点となり、どんなに不平衡であっても合計は 0 となります。

平衡している場合、零相電圧＝0 となります。

逆相成分



$$\dot{V}_2 = \frac{1}{3}\left(\dot{V}_a + a^2\dot{V}_b + a\dot{V}_c\right)$$

$\dot{V}_b$ を 240°回転させ、$\dot{V}_c$ を 120°回転させて加算します。

平衡している場合、逆相電圧＝0 となります。

まとめて数列で表示

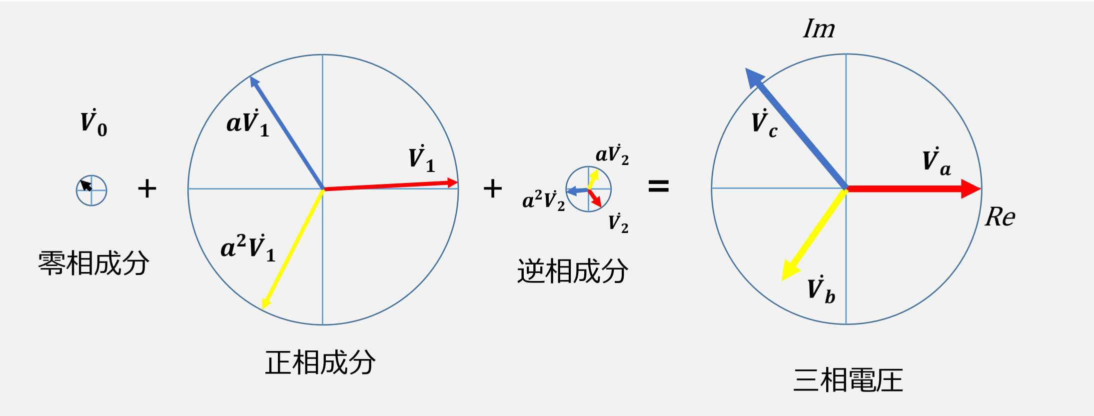
$$\dot{V}_0 = \frac{1}{3}\left(\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c\right)$$
$$\dot{V}_1 = \frac{1}{3}\left(\dot{V}_a + a\dot{V}_b + a^2\dot{V}_c\right)$$
$$\dot{V}_2 = \frac{1}{3}\left(\dot{V}_a + a^2\dot{V}_b + a\dot{V}_c\right)$$

$$\begin{pmatrix}\dot{V}_0\\ \dot{V}_1\\ \dot{V}_2\end{pmatrix} = \frac{1}{3}\begin{pmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a & a^2\\ 1 & a^2 & a\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\dot{V}_a\\ \dot{V}_b\\ \dot{V}_c\end{pmatrix}$$

電圧不平衡率

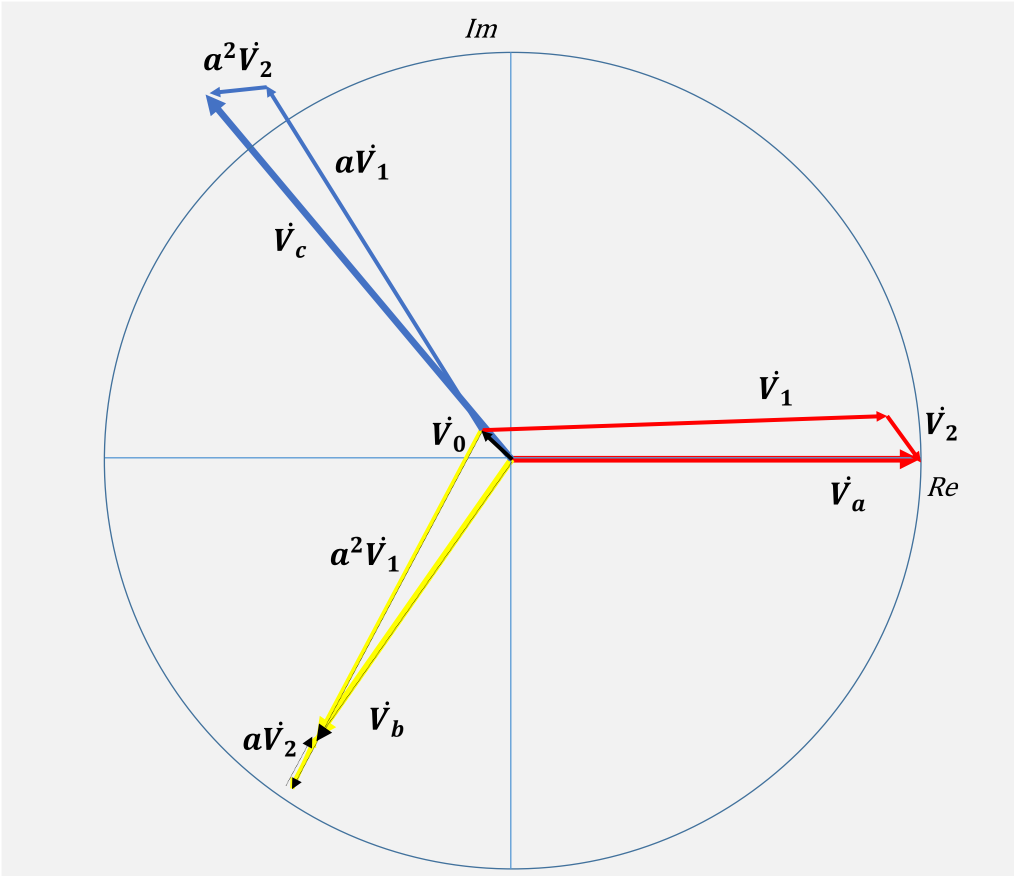
$$\text{電圧不平衡率} = \frac{\text{逆相成分}|\dot{V}_2|}{\text{正相成分}|\dot{V}_1|} \times 100\ 【\%】$$

零相成分、正相成分、逆相成分から復元する各相電圧



$$\dot{V}_a = \dot{V}_0 + \dot{V}_1 + \dot{V}_2$$
$$\dot{V}_b = \dot{V}_0 + a^2\dot{V}_1 + a\dot{V}_2$$
$$\dot{V}_c = \dot{V}_0 + a\dot{V}_1 + a^2\dot{V}_2$$

$$\begin{pmatrix}\dot{V}_a\\ \dot{V}_b\\ \dot{V}_c\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a^2 & a\\ 1 & a & a^2\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\dot{V}_0\\ \dot{V}_1\\ \dot{V}_2\end{pmatrix}$$



数式に代入することで、復元されることが確認できます。

$$\begin{pmatrix}\dot{V}_a\\ \dot{V}_b\\ \dot{V}_c\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1&1&1\\1&a^2&a\\1&a&a^2\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\dot{V}_0\\ \dot{V}_1\\ \dot{V}_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1&1&1\\1&a^2&a\\1&a&a^2\end{pmatrix}\cdot\frac{1}{3}\begin{pmatrix}1&1&1\\1&a&a^2\\1&a^2&a\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\dot{V}_a\\ \dot{V}_b\\ \dot{V}_c\end{pmatrix}$$

$$=\frac{1}{3}\begin{pmatrix}1&1&1\\1&a^2&a\\1&a&a^2\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1&1&1\\1&a&a^2\\1&a^2&a\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\dot{V}_a\\ \dot{V}_b\\ \dot{V}_c\end{pmatrix}$$

$$=\frac{1}{3}\begin{pmatrix}3&1+a+a^2&1+a^2+a\\1+a^2+a&1+a^3+a^3&1+a^4+a^2\\1+a+a^2&1+a^2+a^4&1+a^3+a^3\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\dot{V}_a\\ \dot{V}_b\\ \dot{V}_c\end{pmatrix}$$

$a^3=1$、$1+a+a^2=0$ なので、

$$=\frac{1}{3}\begin{pmatrix}3&0&0\\0&3&0\\0&0&3\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\dot{V}_a\\ \dot{V}_b\\ \dot{V}_c\end{pmatrix}$$

$$=\begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\dot{V}_a\\ \dot{V}_b\\ \dot{V}_c\end{pmatrix}$$

数列

$$A=\frac{1}{3}\begin{pmatrix}1&1&1\\1&a&a^2\\1&a^2&a\end{pmatrix}$$

とおけば、逆行列は、

$$A^{-1}=\begin{pmatrix}1&1&1\\1&a^2&a\\1&a&a^2\end{pmatrix}$$

となります。 $A\cdot A^{-1}=1$ **です。**

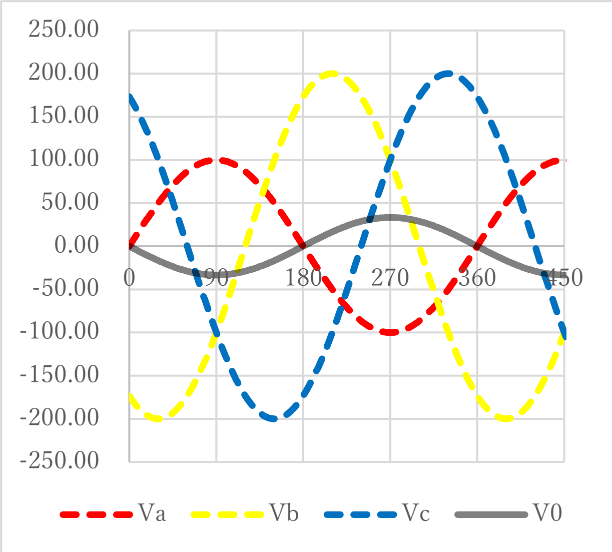
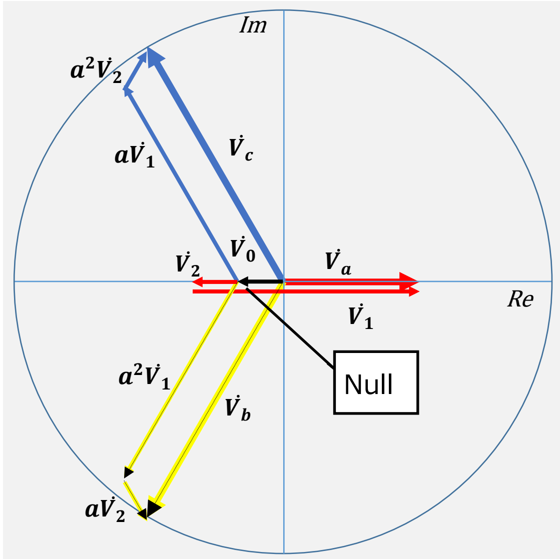
変換式は以下のようにあらわすこともできます。

$$\begin{pmatrix}\dot{V}_0\\ \dot{V}_1\\ \dot{V}_2\end{pmatrix}=A\begin{pmatrix}\dot{V}_a\\ \dot{V}_b\\ \dot{V}_c\end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix}\dot{V}_a\\ \dot{V}_b\\ \dot{V}_c\end{pmatrix}=A^{-1}\begin{pmatrix}\dot{V}_0\\ \dot{V}_1\\ \dot{V}_2\end{pmatrix}$$

各相電圧波形の合成と零相成分

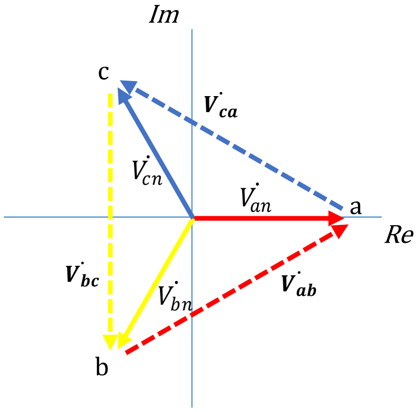
理論上では、平衡している 3 相電圧波形をそのまま加算すれば、合計は常に 0 となります。この時、各相が丁度打ち消し合っていると理解することがきます。不平衡の場合には、3 相電圧波形の合計は完全には打ち消されず、電圧が残ります。しかしこれは零相電圧 $\dot{V}_0$ ではありません。零相電圧 $\dot{V}_0$ は 3 で除算します。

	
$100\sin(\omega t) + 200\sin(\omega t + 120) + 200\sin(\omega t - 120)$ $= 100\sin(\omega t - 180)$ $\neq \dot{V}_0$	$\dot{V}_0 = \frac{100}{3}\angle 180 \Leftrightarrow \frac{100}{3}\sin(\omega t - 180)$

すなわち、単に 1 相のみ電圧が低いだけの状態であっても、三相バランスが崩れるため、三相の中心点（Null 点）がシフトし他の相にも影響を及ぼします。このシフト分が零相電圧 $\dot{V}_0$ です。

相電圧（Y 回路）/線間電圧と対称座標変換まとめ

対称座標法の簡単なまとめとして、実用的ではない、取扱に注意が必要な変換式も、敢えて掲載しています。
総合的な理解をより一層深めることを目的として、“対を為す変換式”を敢えて示しています。



	相電圧（Y 回路）:Phase Voltage（Y circuit）	線間電圧：Line Voltage
三相電圧 $\dot{V}_{abc}$	$\begin{pmatrix}\dot{V}_{an}\\\dot{V}_{bn}\\\dot{V}_{cn}\end{pmatrix}=\frac{1}{3}\begin{pmatrix}1&0&-1\\-1&1&0\\0&-1&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\dot{V}_{ab}\\\dot{V}_{bc}\\\dot{V}_{ca}\end{pmatrix}$ ※1	$\begin{pmatrix}\dot{V}_{ab}\\\dot{V}_{bc}\\\dot{V}_{ca}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1&-1&0\\0&1&-1\\-1&0&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\dot{V}_{an}\\\dot{V}_{bn}\\\dot{V}_{cn}\end{pmatrix}$ ※2
対称座標変換 Symmetrical Components	${}_{Phase}\begin{pmatrix}\dot{V}_0\\\dot{V}_1\\\dot{V}_2\end{pmatrix}=\frac{1}{3}\begin{pmatrix}1&1&1\\1&a&a^2\\1&a^2&a\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\dot{V}_{an}\\\dot{V}_{bn}\\\dot{V}_{cn}\end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix}\dot{V}_{an}\\\dot{V}_{bn}\\\dot{V}_{cn}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1&1&1\\1&a^2&a\\1&a&a^2\end{pmatrix}{}_{Phase}\begin{pmatrix}\dot{V}_0\\\dot{V}_1\\\dot{V}_2\end{pmatrix}$ ※3	${}_{Line}\begin{pmatrix}\dot{V}_0\\\dot{V}_1\\\dot{V}_2\end{pmatrix}=\frac{1}{3}\begin{pmatrix}1&1&1\\1&a&a^2\\1&a^2&a\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\dot{V}_{ab}\\\dot{V}_{bc}\\\dot{V}_{ca}\end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix}\dot{V}_{ab}\\\dot{V}_{bc}\\\dot{V}_{ca}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1&1&1\\1&a^2&a\\1&a&a^2\end{pmatrix}{}_{Line}\begin{pmatrix}\dot{V}_0\\\dot{V}_1\\\dot{V}_2\end{pmatrix}$ ※4
零相・正相・逆相電圧 $\dot{V}_{012}$	${}_{Phase}\begin{pmatrix}\dot{V}_0\\\dot{V}_1\\\dot{V}_2\end{pmatrix}=\frac{1}{3}\begin{pmatrix}0&0&0\\0&1-a&0\\0&0&1-a^2\end{pmatrix}{}_{Line}\begin{pmatrix}\dot{V}_0\\\dot{V}_1\\\dot{V}_2\end{pmatrix}$ ${}_{Phase}\dot{V}_1=\frac{1}{\sqrt{3}}e^{-j30}{}_{Line}\dot{V}_1$ ${}_{Phase}\dot{V}_2=\frac{1}{\sqrt{3}}e^{j30}{}_{Line}\dot{V}_2$	${}_{Line}\begin{pmatrix}\dot{V}_0\\\dot{V}_1\\\dot{V}_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0&0&0\\0&1-a^2&0\\0&0&1-a\end{pmatrix}{}_{Phase}\begin{pmatrix}\dot{V}_0\\\dot{V}_1\\\dot{V}_2\end{pmatrix}$ ${}_{Line}\dot{V}_1=\sqrt{3}e^{j30}{}_{Phase}\dot{V}_1$ ${}_{Line}\dot{V}_2=\sqrt{3}e^{-j30}{}_{Phase}\dot{V}_2$

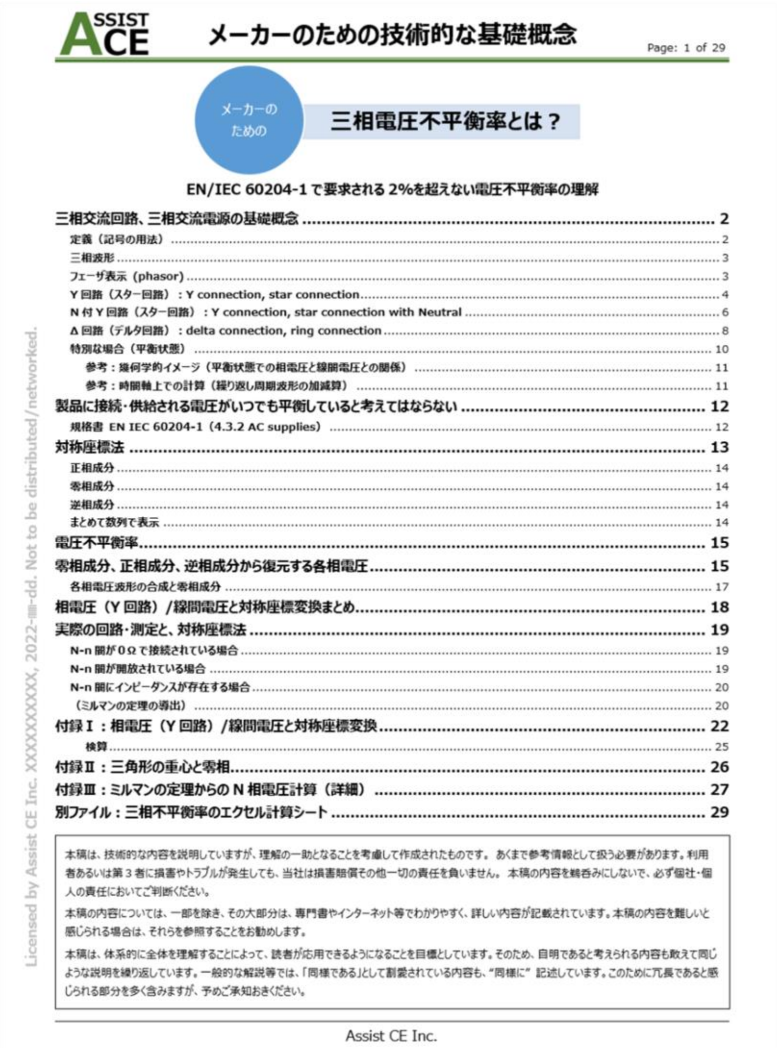
※1 この変換式は、$\dot{V}_0$ を考慮する必要がある場合には用いないか、$\dot{V}_0$ は不定として扱う必要があります。
※2 相電圧から線間電圧を算出するとき、共有成分（$=\dot{V}_0$）は除去されます。
※3 この変換式のみが $\dot{V}_0$ を含む相電圧を再現できます。
※4 線間電圧では $\dot{V}_0=0$ です。

別ファイル：三相不平衡率のエクセル計算シート

簡単な計算シート（エクセル）を以下からダウンロードできます。是非ご活用ください。

有料版のご案内

本稿は無料版につき、有料版に比べて、よりやさしい解説やより詳細な解説は割愛されています。


メーカーのための技術的な基礎概念 Page: 1 of 29

メーカーのための　三相電圧不平衡率とは？

EN/IEC 60204-1 で要求される 2%を超えない電圧不平衡率の理解

本稿は、技術的な内容を説明していますが、理解の一助となることを考慮して作成されたものです。あくまで参考情報として扱う必要があります。利用者あるいは第 3 者に損害やトラブルが発生しても、当社は損害賠償その他一切の責任を負いません。本稿の内容を鵜呑みにしないで、必ず個社・個人の責任においてご判断ください。

本稿の内容については、一部を除き、その大部分は、専門書やインターネット等でわかりやすく、詳しい内容が記載されています。本稿の内容を難しいと感じられる場合は、それらを参照することをお勧めします。

本稿は、体系的に全体を理解することによって、読者が応用できるようになることを目標としています。そのため、自明であると考えられる内容も敢えて同じような説明を繰り返しています。一般的な解説等では、「同様である」として割愛されている内容も、"同様に" 記述しています。このために冗長であると感じられる部分を多く含みますが、予めご承知おきください。

Assist CE Inc.

より詳細な解説につきましては、是非有料版をお買い求めください。