

# 三相電圧平衡化機能および力率一定制御機能付き STATCOM の開発

Development of STATCOM with three-phase voltage balancing and constant power factor control

小池 拓夢<sup>※</sup>  
Takumu Koike  
五藤 和志<sup>※</sup>  
Kazushi Goto  
辻本 賢次<sup>※</sup>  
Kenji Tujimoto

廣瀬 和雅<sup>※</sup>  
Kazumasa Hirose  
岡庭 雅幸<sup>※</sup>  
Masayuki Okaniwa

## 1. はじめに

近年、再生可能エネルギーを利用する分散型電源が大量に配電系統に接続されている。これらの分散型電源の主流である太陽光発電や風力発電は、日射や風速の変動に発電電力が左右され、配電線の電圧を短時間かつ頻繁に変動させる。また、分散型電源に用いられる一部のパワーコンディショナは、単独運転を検出する為の能動的検出機能（無効電力注入方式）を具備しており、周期的かつ高速な電圧変動を引き起こす可能性がある。これらの分散型電源がさらに増加する場合は、配電系統の電力品質の低下が懸念される。

当社は、配電線の電圧変動を抑制する高圧配電線用 STATCOM (STATic synchronous COMpensator) の研究開発に取り組み、2016年に製品化した。さらに、2019年に改良型として STATCOM を高速応答化し、同時に小型化・軽量化した A<sup>2</sup>(Aichi Advanced)-STATCOM を開発した。

今回、三相電圧平衡化機能の検討と従来から持つ機能(電圧一定制御および無効電力一定制御、フリッカ抑制制御)に力率一定制御機能を A<sup>2</sup>-STATCOM に追加したので紹介する。

## 2. STATCOM の特長

STATCOM は、自励式 SVC (Static Var Compensator) ともよばれ、インバータによって無効電力を連続的かつ高速に制御し、無効電力によって配電線の電圧を調整する装置である。STATCOM の特長は、SVR (Step Voltage Regulator) のような機械接点による電圧調整ではなく、機械的摩擦のない半導体による調整であり、メンテナンス周期を長くすることができる。また、TVR (Thyristor-type Step Voltage Regulator) で使用されるサイリスタより高速なスイッチング動作が可能な半導体 (IGBT) 等でインバータを構成するため、TVR より速い応答が可能である。さらに、SVR や TVR のようなタップ切換えによる段階的な電圧調整ではなく、インバータ制御による無段階の電圧調整が可能である。

また、SVR や TVR は配電線に直列に接続されるため、電圧調整効果の範囲が設置点より負荷側に限られるのに対して、STATCOM は並列に接続されるため、無効電力による電圧調整効果が配電系統全体に及ぶ。

## 3. 三相電圧平衡化機能

単相の負荷や分散型電源が接続される配電線の接続相の偏りによって、三相電圧が不平衡となる。近年、この電圧不平衡による問題が顕在化している。三相電圧不平衡の改善策としては、単相負荷の接続相の切換が考えられるが、その作業量は大変多くなる。この課題解決のために、A<sup>2</sup>-STATCOM に三相電圧平衡化機能を検討した。

### 3.1 三相電圧平衡化機能の概要

図1に三相電圧平衡化機能の構成を示す。三相電圧平衡化機能は、A<sup>2</sup>-STATCOM の出力電流の逆相成分を用いて電圧不平衡(逆相成分)を抑制する。三相電圧が不平衡となった場合に制御ユニットが受電点の電圧不平衡(逆相成分)を検出し、電圧が平衡となるように逆相電流指令値をインバータに送る。インバータは、指令値に従い電流を出力する。なお、A<sup>2</sup>-STATCOM は、出力電流の正相成分を用いて、他の3つの制御(電圧一定制御、無効電力一定制御およびフリッカ抑制制御)も行う。正相と逆相は独立に制御が可能で、STATCOM が出力する無効電流は正相成分の電流指令値と逆相成分の電流指令値の和となる。

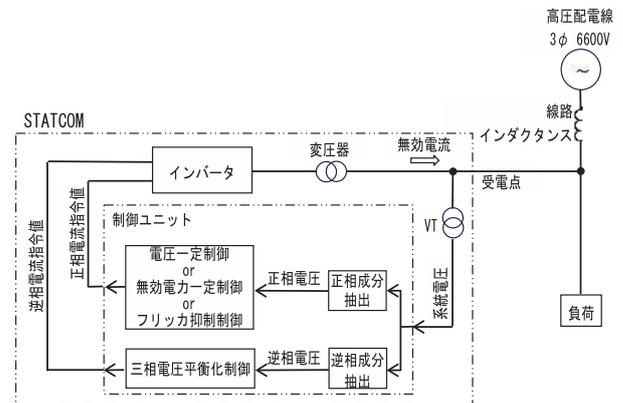


図1 三相電圧平衡化機能の制御構成

### 3.2 逆相電圧の抽出

A<sup>2</sup>-STATCOM の出力電圧制御は、瞬時複素交流理論(イデア理論)により実現している。測定した系統の電圧を  $\alpha\beta$  変換、 $\gamma\delta$  変換によって座標変換する。変換後の座標上でフィードバック制御によって STATCOM が出力する無効電流指令値を計算し、逆座標変換で実際に操作する電気量の指令値に戻して制御を行う。座標変換後の電圧不平衡(逆相

※電力カンパニー システム開発センター パワエレ開発グループ

成分)の現れ方を、三相正弦波を正相の瞬時値ベクトルと逆相の瞬時値ベクトルに分けて考える。正相の瞬時値ベクトルと逆相の瞬時値ベクトルを式(1)、式(2)に示す。

$$\dot{V}_p = \sqrt{2}V_p \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_p) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_p) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_p) \end{bmatrix} \cdot \dots \cdot (1)$$

$$\dot{V}_n = \sqrt{2}V_n \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_n) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_n) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_n) \end{bmatrix} \cdot \dots \cdot (2)$$

$\dot{V}_p$ : 正相瞬時値ベクトル  $\dot{V}_n$ : 逆相瞬時値ベクトル  
 $V_p$ : 正相電圧の実効値  $V_n$ : 逆相電圧の実効値  
 $\varphi_p$ : 正相電圧の位相  $\varphi_n$ : 逆相電圧の位相  
 $\omega$ : 角周波数

正相と逆相の瞬時値ベクトル式(1)、式(2)に $\alpha\beta$ 変換を行い、正相のアイデアベクトル式(3)と逆相のアイデアベクトル式(4)を求める。

$$\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \sqrt{2}V_p \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_p) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_p) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_p) \end{bmatrix} \\ = \sqrt{3}V_p \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_p) \\ \sin(\omega t + \varphi_p) \end{bmatrix} \cdot \dots \cdot (3)$$

$$\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \sqrt{2}V_n \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_n) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_n) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_n) \end{bmatrix} \\ = \sqrt{3}V_n \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_n) \\ -\sin(\omega t + \varphi_n) \end{bmatrix} \cdot \dots \cdot (4)$$

さらに、逆相成分をフェーザ化させるため、式(3)、式(4)に各周波数 $\omega$ で正回転する大きさが1のアイデアベクトルを乗することで $\gamma\delta$ 変換を行い、正相のアイデア式(5)、逆相のフェーザ式(6)を求める。

$$\begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \sqrt{3}V_p \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_p) \\ \sin(\omega t + \varphi_p) \end{bmatrix} \\ = \sqrt{3}V_p \begin{bmatrix} \cos(2\omega t + \varphi_p) \\ \sin(2\omega t + \varphi_p) \end{bmatrix} \\ \Leftrightarrow \sqrt{3}V_p e^{j(2\omega t + \varphi_p)} \cdot \dots \cdot (5)$$

$$\begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \sqrt{3}V_n \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_n) \\ -\sin(\omega t + \varphi_n) \end{bmatrix} \\ = \sqrt{3}V_n \begin{bmatrix} \cos \varphi_n \\ \sin \varphi_n \end{bmatrix} \\ \Leftrightarrow \sqrt{3}V_n e^{j\varphi_n} \cdot \dots \cdot (6)$$

式(5)より、 $\gamma\delta$ 変換後の正相成分には $2\omega t$ が含まれることから系統の2倍の周波数で回転する第2調波となる。式(6)より、 $\gamma\delta$ 変換後の逆相成分には $\omega t$ が含まれないことから系統の周波数によらない直流成分となる。実際の系統の電圧のアイデアベクトルは式(5)と式(6)の和となる。系統の電圧のアイデアベクトルを、第2調波を除去するフィルタ(逆相成分抽出フィルタ)を通過させることで電圧不平衡(逆相成分)を抽出する。

### 3.3 逆相成分抽出フィルタ

通常、配電系統における電圧不平衡率は数%であり、正相電圧は逆相電圧の数十倍である。逆相成分を抽出するためには $\gamma\delta$ 変換後の正相成分が逆相成分に対して1/10以下となるようフィルタで除去する必要がある。正相成分をIIR型LPF(Infinite Impulse Response type Low Pass Filter)のみで除去しようとした場合、IIR型LPFの遮断周波数を低くする必要があり、逆相電圧の抽出が遅れ、不平衡抑制の応答が遅くなってしまいます。そのため第2調波の正相フェーザの除去にはFIR型フィルタ(Finite Impulse Response type Filter)を使用した。FIR型フィルタの周波数特性を図2に示す。

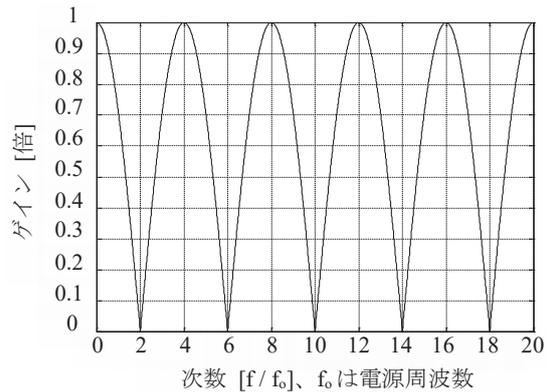


図2 FIR型フィルタの周波数特性

また、実際の配電系統では基本波成分以外に高調波成分も含まれ、主な高調波の次数は3次、5次、7次である。 $\gamma\delta$ 変換によって正相成分の高調波の次数は+1次移動するため、 $\gamma\delta$ 変換後では4次、6次、8次となって現れる。これらの高調波成分はIIR型LPFを使用して除去する。IIR型LPFの周波数特性を図3に示す。

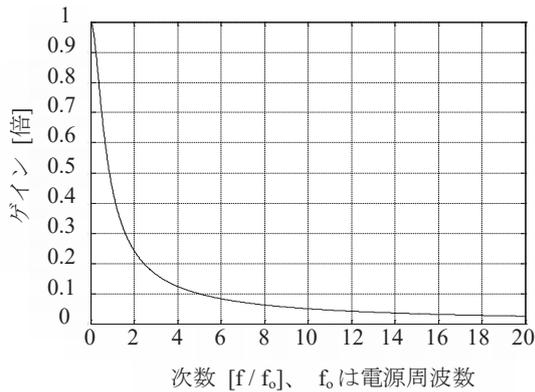


図3 IIR型LPFの周波数特性

FIR型フィルタとIIR型LPFを組み合わせたフィルタの周波数特性を図4に示す。FIR型フィルタとIIR型LPFを組み合わせることによってIIR型LPFの遮断周波数を高くすることができる。これにより、逆相電圧を高速に検出が可能であり、配電系統の電圧平衡化機能の応答を速くすることができる。このフィルタによって直流成分(逆相成分)のみを検出し、その成分を打ち消すようにA<sup>2</sup>-STATCOMから無効電力を出力させることで、三相電圧を平衡化させる。

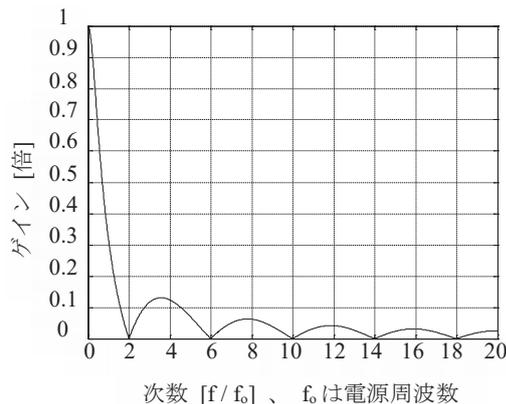


図4 FIR型フィルタとIIR型LPFを組み合わせたフィルタの周波数特性

## 4. 力率一定制御

近年、再生可能エネルギーのうち、安定して電力の供給が可能である小水力発電への期待が高まり、徐々に設備が増加している。小水力発電は、構造が単純堅牢でメンテナンスが容易な誘導発電機が採用される場合がある。発電機と系統を連系する際は、系統連系技術要件により受電点における力率を原則85%以上とし、かつ系統から見て進み力率とならないようにすることが求められるが、誘導発電機は力率を調整することができない。そのため、誘導発電機を採用する場合は、力率調整装置が必要となることが多い。

この力率調整をA<sup>2</sup>-STATCOMで行えるよう、力率一定制御機能を開発した。

## 4.1 力率一定制御の概要

図5に力率一定制御の構成図を示す。受電点に設置したCTとA<sup>2</sup>-STATCOM内のVTで受電点の有効電力と無効電力を測定する。測定した受電点の有効電力とA<sup>2</sup>-STATCOMで設定した力率設定値から目標となる受電点の無効電力指令値を求める。求めた無効電力指令値と受電点の無効電力を比較し、その不足分に相当する電力をA<sup>2</sup>-STATCOMが出力する(図6参照)。

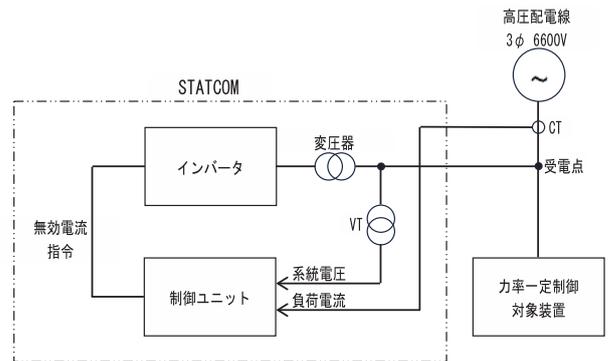


図5 力率一定制御の構成

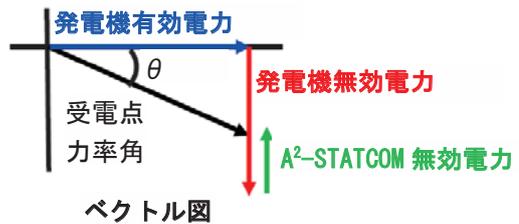


図6 力率一定制御の電力ベクトル図

## 4.2 力率一定制御の仕様

力率一定制御の仕様は表1に示す。

表1 力率一定制御の仕様

項目	仕様
力率一定精度	力率一定対象装置の有効電力が100 kW以上において、力率設定値の±0.05以内
力率設定範囲	+0.75 ~ 1.00 ~ -0.75 (分解能0.01) (+:遅相、 -:進相)
応答時間	50 ms以内(80%補償時間)

## 4.3 力率一定制御の精度

力率一定制御の精度は、受電点の電力値の計算誤差によって決まる。電力値の計算誤差が最大となるのは、受電点の力率を測定する電圧検出回路および電流検出回路の測定誤差が最大のときである。これを考慮し、力率誤差が仕様の±0.05以内を満たすように設計した。電圧・電流検出回

路の位相の測定誤差を表2に示す。

表2 電圧電流検出回路の位相の測定誤差

項 目		位相の測定誤差
電流検出回路	外部CT	±2.0°
	その他の部品 <sup>(※1)</sup>	±1.0°
電圧検出回路	VT	±0.1°
	その他の部品 <sup>(※1)</sup>	±1.0°
合 計		±4.1°

※1 基板上のVT、CTなど

力率の誤差は以下の式で計算する。

$$\Delta PF = -\sin\varphi_0 \cdot \Delta\varphi_{err} \cdot \dots \cdot \dots \cdot (8)$$

$\Delta PF$  : 力率の誤差

$\varphi_0$  : 力率角の真値

$\Delta\varphi_{err}$  : 電圧検出回路と電流検出回路を合わせた位相誤差

例えば、力率角が 0.75、位相誤差 ±4.1°の場合、力率の誤差 ( $\Delta PF$ ) は 0.046 となる。

## 4.4 電力フェーザ

力率一定制御は、電源周波数成分のみを対象としているので、正相成分を用いて制御を行う。そのため式(3)の正相のアイデアベクトルと、式(4)の逆相のアイデアベクトルに対して正回転の基本周波数で  $\gamma\delta$  変換を行い、正相の電圧フェーザおよび逆相の電圧アイデアを求める。

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \cos\omega t & \sin\omega t \\ -\sin\omega t & \cos\omega t \end{bmatrix} \sqrt{3}V_p \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_{vp}) \\ \sin(\omega t + \varphi_{vp}) \end{bmatrix} \\ &= \sqrt{3}V_p \begin{bmatrix} \cos\varphi_{vp} \\ \sin\varphi_{vp} \end{bmatrix} \\ &\Leftrightarrow \sqrt{3}V_p e^{j\varphi_{vp}} \cdot \dots \cdot \dots \cdot (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \cos\omega t & \sin\omega t \\ -\sin\omega t & \cos\omega t \end{bmatrix} \sqrt{3}V_n \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_{vn}) \\ -\sin(\omega t + \varphi_{vn}) \end{bmatrix} \\ &= \sqrt{3}V_n \begin{bmatrix} \cos(2\omega t + \varphi_{vn}) \\ -\sin(2\omega t + \varphi_{vn}) \end{bmatrix} \\ &\Leftrightarrow \sqrt{3}V_n e^{-j(2\omega t + \varphi_{vn})} \cdot \dots \cdot \dots \cdot (10) \end{aligned}$$

$\varphi_{vp}$  : 正相電圧の位相

$\varphi_{vn}$  : 逆相電圧の位相

同様に電流も  $\gamma\delta$  変換を行い、正相の電流アイデアおよび逆相の電流フェーザを求める。

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \cos\omega t & \sin\omega t \\ -\sin\omega t & \cos\omega t \end{bmatrix} \sqrt{3}I_p \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_{ip}) \\ \sin(\omega t + \varphi_{ip}) \end{bmatrix} \\ &= \sqrt{3}I_p \begin{bmatrix} \cos\varphi_{ip} \\ \sin\varphi_{ip} \end{bmatrix} \\ &\Leftrightarrow \sqrt{3}I_p e^{j\varphi_{ip}} \cdot \dots \cdot \dots \cdot (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \cos\omega t & \sin\omega t \\ -\sin\omega t & \cos\omega t \end{bmatrix} \sqrt{3}I_n \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_{in}) \\ -\sin(\omega t + \varphi_{in}) \end{bmatrix} \\ &= \sqrt{3}I_n \begin{bmatrix} \cos(2\omega t + \varphi_{in}) \\ -\sin(2\omega t + \varphi_{in}) \end{bmatrix} \\ &\Leftrightarrow \sqrt{3}I_n e^{-j(2\omega t + \varphi_{in})} \cdot \dots \cdot \dots \cdot (12) \end{aligned}$$

$\varphi_{ip}$  : 正相電流の位相

$\varphi_{in}$  : 逆相電流の位相

よって、電圧フェーザと電流フェーザから電力フェーザを求めると次のようになる。ここで電圧フェーザは式(9)および式(10)の複素共役を用いて計算する。

$$\begin{aligned} & \{ \sqrt{3}V_p e^{-j\varphi_{vp}} + \sqrt{3}V_n e^{j(2\omega t + \varphi_{vn})} \} \\ & \cdot \{ \sqrt{3}I_p e^{j\varphi_{ip}} + \sqrt{3}I_n e^{-j(2\omega t + \varphi_{in})} \} \\ &= 3 \{ V_p I_p e^{-j(\varphi_{vp} - \varphi_{ip})} + V_p I_n e^{-j2\omega t} e^{-j(\varphi_{in} + \varphi_{vp})} \\ & \quad + V_n I_p e^{j2\omega t} e^{j(\varphi_{in} + \varphi_{ip})} + V_n I_n e^{j(\varphi_{in} - \varphi_{in})} \} \\ & \quad \cdot \dots \cdot \dots \cdot (13) \end{aligned}$$

式(13)より、受電点に電圧不平衡が発生している場合は電力フェーザの計算結果に正相の第2調波成分 ( $V_n e^{j2\omega t}$  を含む項) が重畳し、電流不平衡が発生している場合は電力フェーザの計算結果に逆相の第2調波成分 ( $I_n e^{-j2\omega t}$  を含む項) が重畳することになる。計算した電力値に高調波が含まれると電力値をフィードバックして制御する A<sup>2</sup>-STATCOM の出力電流には、不平衡の大きさはそのまま、周波数は逆  $\gamma\delta$  変換によって次数が+1次移動した正相の第3調波成分および逆相の基本波成分として現れることになる。そのため電力フェーザに含まれる正相および逆相の第2調波成分をLPF(Low Pass Filter)によって抑制する。

## 4.5 LPFの設計

表4に受電点の電圧および電流の不平衡が原因で現れるA<sup>2</sup>-STATCOMの出力電流の第3調波成分及び逆相成分の目標低減値を示す。第3調波成分はA<sup>2</sup>-STATCOMの総合高調波歪率の仕様が3%以下であるため、その1/10の0.3%以下となるよう抑制する。また、逆相成分は受電点電流より十分に小さくする必要がある。受電点電流は負荷電流とA<sup>2</sup>-STATCOM出力電流の合成であり、A<sup>2</sup>-STATCOMの出力電流は負荷電流より小さい。よって、A<sup>2</sup>-STATCOMの出力電流の不平衡率が1%以下となるよう逆相成分を抑制する。表4の値をもとにLPFを設計した。

表4 電力フェーザの逆相成分の目標低減値

受電点の不平衡成分	条 件
電 圧	第3調波成分 3次の高調波含有率が0.3%以下
電 流	逆相成分 STATCOM出力電流の1%以下

## 4.6 シミュレーション

無効電力制御の応答時間の設計値は 40 ms であり、計算に間違いが無い事を確認するためシミュレーションを行った。無効電力指令値を 0 kvar → 300 kvar → 0 kvar と変化させた場合のシミュレーション結果を図 7 に示す。シミュレーションの結果、応答時間は 40 ms となり設計値と一致した。

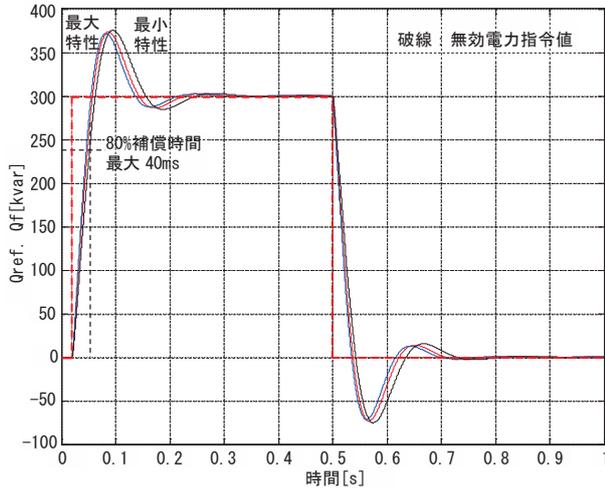


図7 力率一定制御のシミュレーション結果

## 4.7 力率一定制御機能の試験結果

受電点の有効電力をステップ状に急変させ、急変前に A<sup>2</sup>-STATCOM が出力していた無効電力を 0 %、急変後の A<sup>2</sup>-STATCOM の出力する無効電力を 100 % として 80 % 補償するまでの応答時間を測定した。試験条件を表 5 に、試験結果を図 8 に示す。応答時間は 39 ms となり、シミュレーションと概ね一致した。

表5 有効電力急変時の応答時間測定の試験

項目	試験条件
力率設定値	+0.75
負荷有効電力	30 kW → 100 kW
負荷無効電力	0 kvar

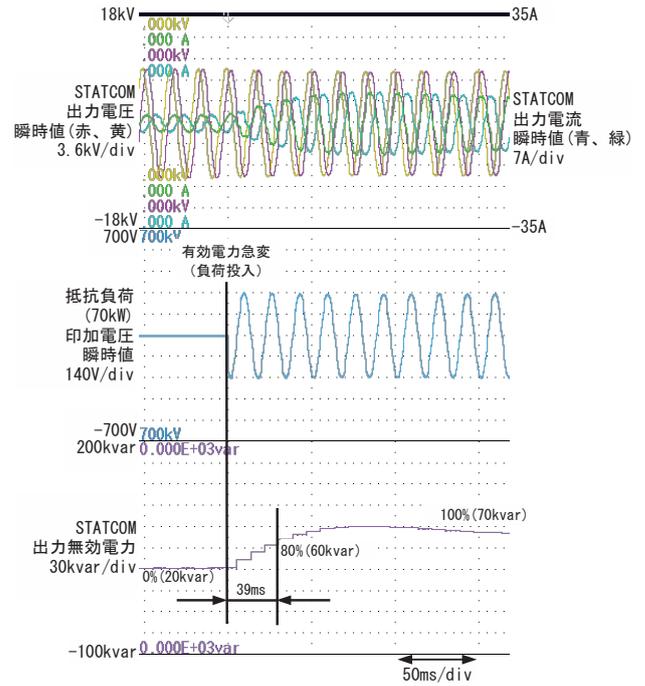


図8 力率一定制御の応答時間測定結果

## 5. あとがき

今回、三相電圧平衡化機能の検討および力率一定制御機能を A<sup>2</sup>-STATCOM に追加した。近年問題となっている分散型電源による配電線の高速かつ多頻度の電圧変動だけでなく、三相電圧の不均衡を改善できる。また、誘導発電機を利用した分散型発電設備の力率改善も容易となる。今後も電圧調整器のトップランナーとして更なる製品開発を進め、電力品質の向上に貢献していく。

## 参考文献

- (1) 「瞬時複素交流理論 (アイデア理論) によるベクトル制御の考察」 愛知電機技報 No.36 (2015)
- (2) 「高圧配電線用 STATCOM の開発」 愛知電機技報 No.37 (2017)
- (3) 「瞬時複素交流理論 (アイデア理論) によるフーリエ変換とラプラス変換の導出」 愛知電機技報 No.38 (2017)
- (4) 「高圧配電線用 STATCOM」 電気評論 第 637 号 (2017)
- (5) 「高圧配電線用 A<sup>2</sup>-STATCOM の開発」 愛知電機技報 No.40 (2019)