

博士論文

進相コンデンサを活用した
配電システムの電力品質向上に関する研究

2009年

小林 浩

名古屋工業大学博士論文

甲第683号(課程修了による)

平成21年3月23日授与

目次

第1章 序論	1
1.1 緒言	1
1.2 配電システムにおける電力品質	2
1.2.1 電力品質とは	2
1.2.2 配電システムにおける電力品質の課題	5
1.2.3 高圧需要家の進相コンデンサの課題	7
1.2.4 電力品質向上に向けた進相コンデンサの積極的活用	13
1.3 本研究の目的と内容	14
1.4 結言	16
第1章 参考文献	17
第2章 高圧需要家における 進相コンデンサ容量の適正選定法	19
2.1 緒言	19
2.2 高圧需要家における力率の実測	20
2.2.1 実測方法	20
2.2.2 力率の評価方法	21
2.2.3 受電点に関する実測結果	22
2.2.4 負荷に関する実測結果	25
2.3 適正な進相コンデンサ容量の選定法	27
2.3.1 進相コンデンサ容量選定法の見直しの必要性	27
2.3.2 適正な進相コンデンサ容量の選定法	29
2.4 シミュレーションによる提案法の有効性の検証	30
2.4.1 シミュレーション内容	30
2.4.2 シミュレーション方法	30
2.4.3 シミュレーション結果	32
2.5 結言	34

第2章 参考文献	35
第3章 高圧需要家への自動力率調整装置導入による 電圧上昇抑制	37
3.1 緒言	37
3.2 従来の評価モデルの課題	38
3.3 実態に合った評価モデルの検討	39
3.3.1 高圧需要家における電力と力率の関係	39
3.3.2 高圧需要家モデル	42
3.3.3 配電システムモデル	44
3.4 自動力率調整装置導入効果の定量評価	44
3.4.1 評価方法	44
3.4.2 評価結果	46
3.5 結言	49
第3章 参考文献	50
第4章 高圧需要家への自動力率調整装置導入による 高調波電圧抑制	51
4.1 緒言	51
4.2 高調波抑制対策ガイドラインの概要	52
4.3 高圧需要家における高調波の実測	53
4.3.1 実測方法	53
4.3.2 高調波電流の分析方法	53
4.3.3 実測結果	56
4.3.4 ガイドラインとの比較	57
4.3.5 自動力率調整装置導入の必要性	59
4.4 シミュレーションモデル	59
4.5 自動力率調整装置の導入効果のシミュレーション	63
4.5.1 シミュレーション条件	63
4.5.2 シミュレーション結果 －配電用変電所一次側に第5調波電圧がない場合－	65

4.5.3	シミュレーション結果	
	-配電用変電所一次側に第5調波電圧がある場合-	68
4.6	結言	70
第4章	参考文献	72
第5章	高圧需要家の自動力率調整装置を活用した 電圧不平衡抑制	73
5.1	緒言	73
5.2	高圧需要家における不平衡の実測	74
5.2.1	実測方法	74
5.2.2	不平衡率の定義と評価方法	74
5.2.3	実測結果	79
5.2.4	負荷電流不平衡率の評価	82
5.3	進相コンデンサを活用した電圧不平衡抑制手法の検討	82
5.3.1	検討内容	82
5.3.2	進相コンデンサ容量調整法	83
5.3.3	評価手法	84
5.3.4	三相一括力率調整法の評価結果	86
5.3.5	相別力率調整法の評価結果	88
5.4	結言	91
第5章	参考文献	92
第6章	進相コンデンサを活用した協調的電圧不平衡抑制手法	93
6.1	緒言	93
6.2	電圧不平衡を抑制する進相コンデンサ制御手法	94
6.2.1	逆相電圧補償法	94
6.2.2	協調制御法	99
6.3	シミュレーションによる検証	100
6.3.1	配電システムモデル	100
6.3.2	シミュレーション結果	102
6.3.3	負荷の不平衡が変化した場合の効果	106

6.3.4	進相コンデンサバンク容量の影響	107
6.4	提案法の効果的な導入箇所の考察	108
6.4.1	考察内容	108
6.4.2	電圧不平衡率	109
6.4.3	配電損失	110
6.4.4	設置容量	111
6.5	結言	112
第6章	参考文献	113
第7章	結論	115
7.1	本論文で得られた成果	115
7.2	今後の課題と将来展望	119
謝辞		123
研究業績		124

第1章

序論

1.1 緒言

電力は高度情報化社会である現代においては欠かすことのできないエネルギーであり、電力供給の信頼性向上は極めて重要な課題である。電力供給の信頼性とは、従来は停電が少ないことがその主たる指標であったが、現在ではこれに加えて、電圧、高調波、不平衡などの電力品質の向上も重要な要素となっている⁽¹⁾。電力品質が適正に維持されないと、電力系統や需要家の設備機器に各種の障害を発生させ、それが結果的に停電に繋がることになる。このような電力品質に関する課題には、電力系統を運用する電気事業者のみが対策すればよいのではなく、電力系統に接続され特別高圧または高圧で受電する需要家や、柱上変圧器を介して低圧で受電する住宅などの低圧需要家も、設置する設備機器の仕様やそれらの使用方法に適切な対策を実施する必要がある。電力品質は電力系統全体の課題であるが、電力品質に影響を与える要因となるのは主として需要家が使用する設備機器である。そのため需要家が直接接続される配電系統は、電力系統の中でも最も電力品質の影響を受けやすく電力品質の管理が重要であるといえる。近年では、地球環境問題への対策として電力エネルギーに関しても省エネルギーの推進が不可欠となっている。例えば、負荷機器においても半導体応用技術を活用したインバータなどを利用することによって、エネルギー効率を高めた機器が広く普及してきている。その一方で、これらの機器は高調波電流を発生することによって配電系統の電力品質を悪化させたり⁽²⁾、逆にノイズなどの影響により停止や誤動作といった障害を受けやすいことから、電力供給の信頼性に少なからず影響を与えることが懸念される。また将来的には、太陽光発電や家庭用燃料電池などの分散型電源の大量導入により⁽³⁾、配電系統には逆潮流による電圧上昇などの電力品質に関する新たな課題が生じることも考えられる。そこで、将来にわたって配電系統の電力品質を適正に維持していくには、電気事業者と需要家が協調して配電系統、受変電設備、負荷機器などを1つの配電システムとして構築するという考え方が必要である。

このような考えの下で、分散型電源や IT 技術を活用して、コスト低減や負荷平準化などの電気事業者と需要家の双方にとってメリットが得られる配電システムとして、需要地系統や FRIENDS などの新しいコンセプトが提案され研究が進められている⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。これらは配電システムが将来目指すべき方向性として重要な位置づけとなる研究である。

しかしながら、現在すでに顕在化している電力品質の課題を、実現可能な手法の適用により解決していくことも、実務面では極めて重要である。需要家電気設備の分野においては、従来からの経験則や過剰な安全率の考慮による過剰設備や、イニシャルコストの低減のみに重点を置いた設備が散見されるのが現実であり、配電システムの電力品質維持を考慮した設計や施工が十分なされているとはいえない状況にある。需要家電気設備は、電力エネルギーの供給設備として、人体への安全を十分に考慮した設計がなされることは当然必要である。しかしながら過剰設備やイニシャルコストの低減のみを考慮した設備の導入は、省エネルギーや CO₂ 削減ならびに資源有効活用の観点では有効であるとはいえない⁽⁷⁾。よって、需要家電気設備の設計、施工においては、竣工後の設備運用状況を客観的な実測などにより正確に把握し、その結果に基づき設計、施工のあり方を見直していくことが必要である。

このような背景の下、本研究では需要家電気設備の中でも、特に高圧需要家が導入する力率改善用進相コンデンサ（以下、SC とする）に着目する。SC は、次節以降で述べるように配電システムの電力品質に多大な影響を与える設備であるが、現状では電力品質を考慮した容量選定や制御が充分にはなされていない。そこで、本研究では将来にわたり配電システムの電力品質維持、向上を実現するため、高圧需要家の SC を有効に活用する手法やその効果を検討していく。

1.2 配電システムにおける電力品質

1.2.1 電力品質とは

配電システムにおいて考慮すべき電力品質には、周波数、供給電圧、電圧不平衡、高調波、電圧ディップ（瞬時電圧低下）、電圧フリッカ、次数間高調波などがある⁽⁸⁾。これらの電力品質事象の中で、本研究で対象とする供給電圧、電圧不平衡、高調波を概説する。

(1) 供給電圧

電気事業法では、供給電圧および周波数について、「供給する電気の電圧および周波数の値を経済産業省令で定める値に維持すること」としており⁽⁹⁾、その具体的数値は表 1.1 のとおり定められている⁽¹⁰⁾。

表 1.1 標準電圧と電気事業者が維持すべき値

Table 1.1 Standard of voltage	
標準電圧	維持すべき値
100V	101±6V
200V	202±20V

(2) 電圧不平衡

電圧不平衡率は次式で定義される⁽¹¹⁾。

$$\text{電圧不平衡率 [\%]} = \frac{V_2}{V_1} \times 100 \quad (1.1)$$

ここで、 V_1 ：正相電圧[V]， V_2 ：逆相電圧[V]

電圧不平衡率の管理値を規定する公的基準はないが、電技解釈第 260 条に規定されている交流式電気鉄道の単相負荷による電圧不平衡率の限度値⁽¹²⁾をもとにした 3 %が電力会社の管理目標値となっている。需要家に対する規定としては、内線規程において不平衡負荷の制限について記述がある⁽¹³⁾。これによると、低圧および高圧受電の三相 3 線式における不平衡負荷の限度を、設備不平衡率で 30 %以下とすることを求めている。なお、設備不平衡率は次の式で定義されている。

$$\text{設備不平衡率 [\%]} = \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{total}/3} \times 100 \quad (1.2)$$

ここで、

S_{max} ：各線間に接続される単相負荷設備容量の最大値[VA]

S_{min} ：各線間に接続される単相負荷設備容量の最小値[VA]

S_{total} ：総負荷設備容量[VA]

(3) 高調波

高調波とは電圧波形や電流波形に含まれる商用周波数の整数倍の成分をいい、例えば電圧に高調波が含まれている度合いは、各次調波電圧ひずみ率、総合電圧ひずみ率として、次式で定義される。

$$\text{第}n\text{調波電圧ひずみ率 [\%]} = \frac{V_n}{V} \times 100 \quad (1.3)$$

$$\text{総合電圧ひずみ率 [\%]} = \sqrt{\sum_{n=2} \left(\frac{V_n}{V}\right)^2} \times 100 \quad (1.4)$$

ここで、 V_n ：第 n 調波電圧の実効値[V]， V ：基本波電圧の実効値[V]

表 1.2 契約電力 1kW あたりの高調波流出電流上限値⁽¹⁵⁾

Table 1.2 Regulated harmonic current per 1kW of power demand

単位[mA/kW]

受電電圧	5次	7次	11次	13次	17次	19次	23次	23次 超過
6.6kV	3.5	2.5	1.6	1.3	1.0	0.9	0.76	0.70
22kV	1.8	1.3	0.82	0.69	0.53	0.47	0.39	0.36
33kV	1.2	0.86	0.55	0.46	0.35	0.32	0.26	0.24
66kV	0.59	0.42	0.27	0.23	0.17	0.16	0.13	0.12
77kV	0.50	0.36	0.23	0.19	0.15	0.13	0.11	0.10
110kV	0.35	0.25	0.16	0.13	0.10	0.09	0.07	0.07
154kV	0.25	0.18	0.11	0.09	0.07	0.06	0.05	0.05
220kV	0.17	0.12	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03
275kV	0.14	0.10	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02

高調波の管理値を規定する法令はないが、電力利用基盤強化懇談会報告（1986年7月～1987年5月）による提言をもとに、総合電圧ひずみ率で、配電系(6.6kV)5%、特高系(66kV～77kV)3%が管理目標値に定められている⁽¹⁴⁾。また、その後の電気協同研究第46巻第2号（高調波対策専門委員会）などの検討結果を踏まえ、1994年9月に「高圧又は特別高圧で受電する需要家の高調波抑制対策ガイドライン」（以下、特定需要家ガイドラインとする）、および、「家電・汎用品高調波抑制対策ガイドライン」が通知された。「家電・汎用品高調波抑制対策ガイドライン」は2004年にJIS規格に移行し、（以下、家電・汎用品ガイドラインとする）、高調波抑制対策の基本となっている⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。特定需要家ガイドラインでは受電点からの高調波流出電流の上限値を表1.2のように定めている。

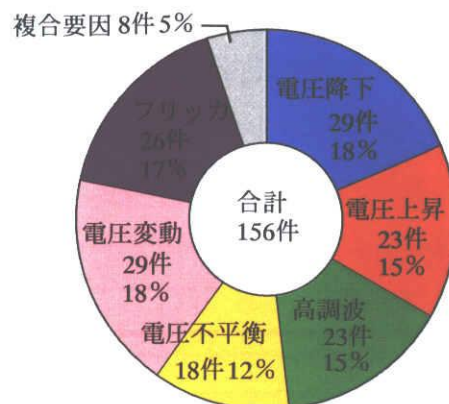


図 1.1 電力品質に起因する電気設備の障害要因

Fig.1.1 Factors of the accident of electrical facilities caused by the power quality

1.2.2 配電システムにおける電力品質の課題

配電システムにおいて電力品質が適正に維持されないと、配電システムを構成する設備機器にさまざまな障害が発生する。図 1.1 に電力品質に起因する設備機器障害の要因別割合の調査事例を示す⁽¹⁷⁾。

供給電圧に関しては電圧降下と電圧上昇の 2 種類があり、障害としては、照明の消灯や機器の誤動作、停止、不動作などがある。高調波による障害の原因には、特定需要家からの高調波電流流出によるものばかりではなく、不特定多数の高調波発生源によるものもある。障害としては、調相設備の異音や焼損、インバータや調相設備などの保護用リレー動作、機器の誤動作や不動作などがある。電圧不平衡による障害の原因には、柱上変圧器の接続相偏りや需要家単相負荷の接続相偏りなどがあり、障害としては、三相モーター保護用リレーの動作、機器の誤動作または停止、不動作などがある。本研究で着目した供給電圧、高調波、電圧不平衡を合計すると件数比で 60% を超えることが分かる。

これらの障害の中でも近年新たな問題として浮上してきたのが、電圧上昇に起因する障害であり、その直接的な要因としては、高圧需要家の SC によるフェランチ現象、配電用変電所送り出し電圧の不適正、柱上変圧器や自家用変圧器のタップ値の不適正、太陽光発電システム等の分散型電源からの逆潮流などがある。これらの要因の中で最も多いのは高圧需要家の SC によるフェランチ現象であり、23 件中 13 件を占めている。

電圧上昇が問題となる背景には、今後普及が一段と進むと考えられる分散型電源がある。分散型電源は、自然エネルギーの有効活用や高いエネルギー効率の実現などのメリットを生かすことで、地球環境問題への対応方策として普及促進が図られている。分散型電源の中でも太陽光発電に着目すると、日本における太陽光発電の導入実績は 2004 年度末で約

113.2 万 kW となっている⁽¹⁸⁾。太陽光発電の導入目標は、資源エネルギー庁のエネルギー需給展望によれば、2010 年において 482 万 kW となっていることから、2004 年からの 6 年間で約 4 倍に増加すると見込まれる⁽¹⁹⁾。

配電系統の電圧が上昇すると、太陽光発電のようにインバータで系統連系する分散型電源では、保護装置の動作などにより十分な発電が困難となる。そのため、自然エネルギーの有効活用を損ねるばかりでなく、売電量の低下により設置需要家へのコストメリットが低下するという問題もあるため、今後の太陽光発電の普及に支障をきたすことになりかねない。よって電圧上昇は現実的に解決しなければならない課題と位置づけられており、そのためには主たる要因である高圧需要家の SC によるフェランチ現象の抑制が必要である。

また、電力品質による障害の中でも、高調波障害は 1994 年に名古屋市科学館で起こった電気室の火災事故により世間に知れ渡ることとなり⁽²⁰⁾、これ以降も年間一定数の障害が報告されている⁽²¹⁾。高調波障害はその 90% が SC または直列リアクトルにおいて発生する⁽²²⁾。そこで SC が高調波に与える影響を整理しておく必要がある。

さらに配電系統における将来的な電力使用形態を考えると、近年の民生分野におけるオール電化住宅や太陽光発電の急速な普及により、ヒートポンプ式給湯器などの夜間使用機器による単相電力需要の増大や、太陽光発電による単相電力の逆流等が想定される。これらが要因となり、電圧不平衡が今後拡大していくことが懸念されることから、電圧不平衡抑制対策はますます重要になってくる。

これらの電力品質に関する課題に対する配電系統側の対策方法は、電圧調整の観点では、配電用変電所では並列コンデンサの設置や変圧器タップ調整があり、配電系統上では SVR (Step Voltage Regulator) の設置がある。しかし、制御手法はタイムスケジュール等の比較的簡易な制御であり、配電系統全体をきめ細かく調整しているわけではない。また高調波抑制の観点では高調波フィルタの設置が挙げられるが、配電系統側に高調波フィルタを設置している例は少ない。技術的には、無効電力制御や高調波抑制手段として SVC (Static Var Compensator) やアクティブフィルタのようにパワーエレクトロニクス技術を活用した機器も実用化されてはいるが、コスト面での課題もあり配電系統に設置される例は少ないのが現状である。これに対し SC と直列リアクトルは SVC 等よりも低コストで、かつ高圧需要家には広く普及している機器であり、無効電力供給源あるいは高調波吸収源として有効に活用することで、配電システム全体として効率よくかつ経済的に電力品質向上を実現できる可能性がある。

1.2.3 高圧需要家の進相コンデンサの課題

前項で述べたように、電力品質に起因する障害要因として、高圧需要家の SC が挙げられる。そこで、本項では高圧需要家における SC の設置目的や一般的な設計手法を概説するとともに、SC の課題を整理する。

(1) 進相コンデンサの設置目的

高圧需要家における SC の設置目的は力率改善による省エネルギーであり、力率改善を進めるための需要家へのインセンティブとして電力料金の力率割引制度がある。

① 力率改善による省エネルギー

有効電力 P の負荷機器に電力を供給する場合、力率を $\cos\theta$ 、負荷端電圧を V 、電源から負荷機器までの配線抵抗を R とすると、配線抵抗により発生する電力損失 W は次式で計算される。

$$W=I^2R=(P/V\cos\theta)^2\times R \quad (1.5)$$

これより、力率を改善する、すなわち $\cos\theta$ を 1 に近づけるほど電力損失は小さくなり、力率が 1 のときに電力損失は最小となる。

② 電力料金の力率割引

電力料金は一般的に基本料金と従量料金からなり、基本料金については力率の値によって割引または割増しがある。この力率は、具体的にはその 1 月のうち毎日 8 時から 22 時までの時間における平均力率をいい、次式で定義される⁽²³⁾。

$$\text{平均力率}[\%]=\frac{\text{有効電力量}}{\sqrt{\text{有効電力量}^2+\text{無効電力量}^2}}\times 100 \quad (1.6)$$

この平均力率が 85% を上回る場合は、その上回る 1% につき基本料金を 1% 割引し、85% を下回る場合は、その下回る 1% につき基本料金を 1% 割増しする。瞬間力率が進み力率となる場合には、その瞬間力率は 100% とする。

(2) 高圧受電設備における進相コンデンサの設計法

高圧受電設備における SC の一般的な設計法を、容量選定、設置・制御方式選定の 2 つの観点で整理する。

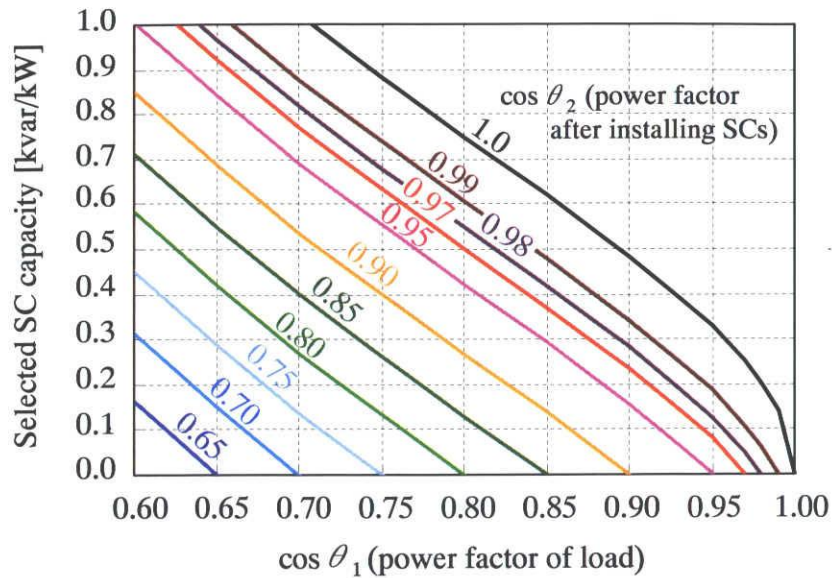


図 1.2 力率改善のための SC 容量選定グラフ

Fig.1.2 The amount of SC for improving power factor

① 容量選定

力率改善のために必要な SC 容量は、次式にて計算することができる⁽²⁴⁾。

$$q = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_1} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_2} - 1} \quad (1.7)$$

ここで、

q : 必要な負荷 1kW あたりに必要な SC 容量[kvar/kW]

$\cos \theta_1$: 改善前力率

$\cos \theta_2$: 改善後力率

(1.7)式を元に、改善前力率と改善後力率を想定したときの SC 容量を算出する図を図 1.2 に示す。従来の負荷機器は、動力設備では誘導電動機が主体であり、その力率は一般用低圧三相かご型誘導電動機の場合、定格出力 3.7~37kW において、遅れ 0.78~0.815 である⁽²⁵⁾。また力率改善の目標値は、平均使用状態において遅れ 0.95 程度が望ましいとされる⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾。そこでこれらの条件から、負荷機器の力率を遅れ 0.80 とし、これを遅れ 0.95 に改善する q を(1.7)式より算出すると、 $q=0.42$ [kvar/kW]となる。これを変圧器容量基準 q' で表すと、 $q'=0.42 / (1/0.8)=0.34$ [kvar/kVA]となり、おおむね変圧器容量の 3 分の 1 の容量となる。このことから SC 容量は三相変圧器容量の 3 分の 1 程度を選定する(以下、3 分の 1 ルールとする) ことが一般的となっている。

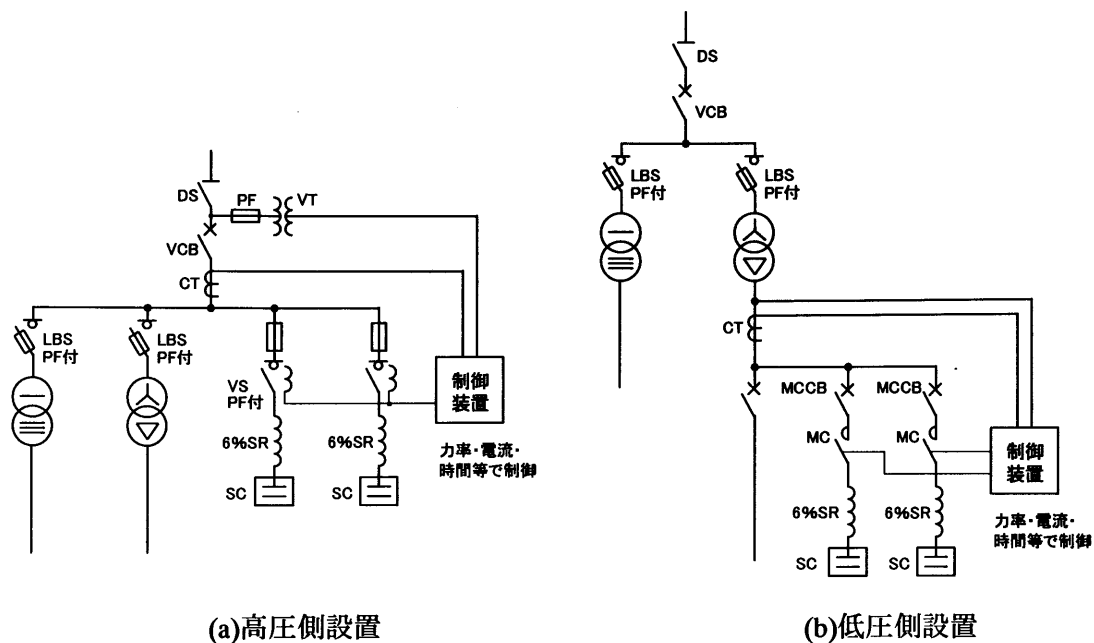


図 1.3 SC を設置した高圧受電設備例

Fig.1.3 Single line diagram of receiving facilities with high voltage SC or low voltage SC

② 設置・制御方式

高圧受電設備における SC の設置箇所は、図 1.3 に示すように高圧側設置と低圧側設置の 2 つに分けられる⁽²⁸⁾。現在の高圧受電設備の設計に関する文献には、SC の設置位置と制御方式に関して次のように記述されている。

〈国土交通省建築設備設計基準〉⁽²⁹⁾

- ・ 受電電力の力率を改善するために、受変電設備には SC を設ける。
- ・ SC 保護用として直列リアクトルを設ける。
- ・ SC は、三相変圧器の低圧側に設置することを原則とする。
- ・ SC は、自動力率制御装置により力率改善を行う。自動力率制御を行う場合の力率は原則として 98% とする。

〈高圧受電設備規程〉⁽³⁰⁾

- ・ SC は負荷の変動に応じて接続する SC の容量を変化できるように施設すること。
- ・ 負荷変動により進み力率となる場合は、SC の回路に開閉装置を施設すること。

自動力率調整装置（以下、APFC とする）は、軽負荷時において需要家の受電力率が過度な進みとなるのを避けるため、力率を常に 1 に近くなるように、通常複数バンク設置された SC の投入容量を、負荷稼動状態に応じて制御するものである。

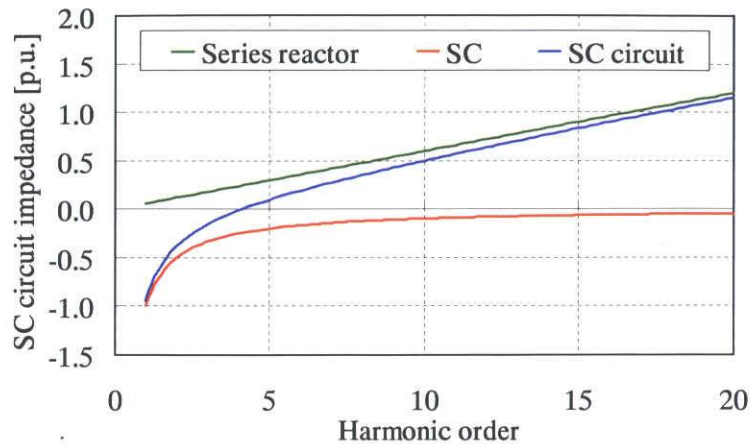


図 1.4 高調波次数と SC 回路インピーダンスの関係

Fig.1.4 Relation between harmonic order and impedance of static capacitor

(3) 進相コンデンサ用直列リアクトルの設置目的

ここで、SC に直列リアクトルを設置する目的について述べておく。第一の目的は、SC 投入時の突入電流の抑制である。APFC などにより SC 回路を頻繁に開閉する場合には、投入時の過大な突入電流による SC や開閉器の劣化抑制や配電系統の瞬時電圧降下抑制のため直列リアクトルを設置する。

また、第二の目的は高調波の抑制である。SC と直列リアクトルの直列回路は直列共振回路であるため、周波数により回路インピーダンスが変化する。直列リアクトルのリアクタンスを SC のリアクタンスの α [%] とすると、SC と直列リアクトルの合成インピーダンス Z_{LC} は次式で表すことができる。

$$Z_{LC} = nX_L - \frac{1}{nX_C} = n\alpha X_C - \frac{1}{nX_C} \quad (1.8)$$

ここで、

X_L : 直列リアクトルのリアクタンス

X_C : SC のリアクタンス

n : 高調波次数

一般的に我が国では直列リアクトルのリアクタンスは 6% に選定される。図 1.4 に $\alpha = 6$ [%] の場合における高調波次数と SC 回路インピーダンスの関係を示す。この場合、直列共振次数は 4.1 次であり、配電系統に最も多く含まれているとされる第 5 調波に対する SC 回路インピーダンスは 0.1 p.u. となる。そのため SC 回路が第 5 調波電流を吸収し配電系統の第 5 調波電圧の上昇を抑制する働きがある。

これに対し SC に直列リアクトルが設置されない場合は、第 5 調波に対する SC 回路インピーダンスが負の値となるため、高圧需要家から流出する第 5 調波電流を拡大させ、配電系統の第 5 調波の電圧を上昇させることが懸念される。

(4) 高圧受電設備における進相コンデンサに関する課題

SC の設置目的や設計法を踏まえ、高圧需要家における SC の課題を、SC 容量の選定法、APFC の設置、力率割引制度の 3 つの観点で整理する。

① SC 容量の選定方法

近年の地球環境問題への対応から、省エネルギーを目的とした負荷設備へのインバータ制御導入が進んでおり、これにより負荷設備の力率が向上してきている。例えば、インバータ機器の整流回路としてよく使用されるコンデンサインプット型整流回路は、基本波力率が 1 に近いものが多い。しかしながら高圧受電設備設計の実務では、誘導電動機が主要負荷であった従来と同様に 3 分の 1 ルールに基づき、改善前力率を遅れ 0.8 程度に想定し SC 容量が選定されている。

また変圧器容量についても、将来の負荷増加等を見込んで負荷設備容量に対して大きめに選定されることが多い。さらに、負荷機器は必ずしも定格状態で稼働するとは限らず、結果的に変圧器需要率（＝最大負荷電力／変圧器容量）は低くなってしまふ。これらの背景から、変圧器容量が基準である 3 分の 1 ルールに基づき SC 容量を選定すると過剰となることが多くなってしまふ。

② 自動力率調整装置の普及遅れ

高圧需要家が APFC を導入する際には、同時に直列リアクトルと高い頻度の開閉が可能な電磁接触器を設置する必要がある。しかしながら、これらの機器は SC 本体と比較して高価であることから、導入時にインシャルコストの増加を招く。また SC を導入した場合の高圧需要家内での省エネルギー効果は、APFC 導入時のインシャルコスト増分と比較すると小さく、コスト回収が困難であることが多い。そのため、現在の設計指針類に必要性が記述されてはいるものの、これまでは SC 回路への開閉装置や APFC の設置はあまり行われず、その結果現状の APFC 導入率は極めて低い。図 1.5 に、中部地区の高圧需要家を対象とした APFC の普及率の調査結果を示す⁽³¹⁾。これによると 受電設備の規模を示す変圧器容量が小さいほど APFC 導入割合は低く、おおむね 5%程度であることが分かる。

APFC が設置されていない高圧需要家では、夜間等の負荷電力が小さくなる時間帯でも SC が開放されないため、結果的に SC 容量が過剰となり受電力率も進みとなってしまふ。

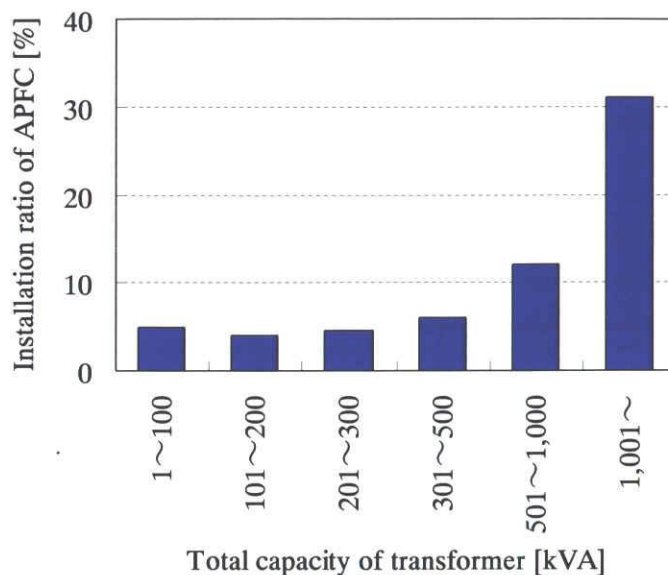


図 1.5 自動力率調整装置の設置率

Fig.1.5 Relation between installation ratio of APFC and capacity of transformer

③ 力率割引制度

力率割引制度の導入により、負荷力率が遅れであっても SC により受電力率を 1 近くまで改善すれば、高圧需要家は電力料金の割引を受けることができる。しかしながら、現行の制度では、「瞬間力率が進み力率となる場合にはその瞬間力率は 100%とする」となっているために、SC 容量が過剰であっても、高圧需要家が享受する力率割引は最大となり、高圧需要家に不利益は発生しない。また現行の力率割引制度では、平均力率は毎日 8 時から 22 時までの時間帯においてのみ算出すればよいため、22 時から 8 時の時間帯は SC を開放していても割引には影響しない。しかしながら、低コスト化を優先するがゆえに、SC を毎日開閉する能力をもつ開閉器を設置せずに SC が終日投入されたままとなる場合が多い。

また設備設計者の立場から考えると、平均力率を 100%とし力率割引を最大にしたいという施主のニーズが現実的にある以上、SC 容量を大きめに選定する傾向になることは否めない。しかし、過剰な進み力率の場合には電流実効値が増加するため、省エネルギー効果を得られないばかりでなく、フェランチ現象による電圧上昇により配電系統の電力品質を悪化させる可能性がある。

1.2.4 電力品質向上に向けた進相コンデンサの積極的活用

以上の背景を踏まえると、配電システムの電力品質を向上するためには、高圧需要家の過剰な SC の抑制と同時に SC への APFC や直列リアクトルの積極的導入が必要である。コスト面での導入促進方策としては、APFC や直列リアクトルの低コスト化と力率割引制度の改善を挙げることができる。しかしながら、APFC や直列リアクトルは製品の構造や仕組みは極めてシンプルであることから、大幅な低コスト化は困難である。また力率割引制度に関しては、電力会社が全国的に古くから運用している制度であることから、変更することは容易ではない。そこで本研究では、APFC や直列リアクトルの導入促進方策を、技術的な観点から次の3つのステップで検討していく。

(1) SC や電力品質の実態把握

配電システムにおける電力品質を将来にわたり維持していくには、現状の把握が極めて重要である。しかしながら、高圧需要家における電力品質は定量的にあまり把握されていなかった。そこで実測調査を通して実態を把握するとともに、SC 容量選定といった需要家電気設備設計の基本事項について、そのあり方の見直しを行う。

(2) SC を活用した既存電力品質維持方策の適正評価

SC への APFC 設置および直列リアクトルの導入は、設計指針にも記載されている既存技術である。しかしながら、配電システムの現状を踏まえた上で、SC の適正な容量選定や APFC の導入が配電システムの電力品質向上にどの程度の効果をもたらすかという客観的かつ定量的な評価は、これまで充分になされていたとはいえない。その理由としては、実態把握が十分でなかったことに加えて、APFC の導入効果を定量的に評価するための高圧需要家モデルが検討されていなかったことが挙げられる。そこで実測調査の結果に基づき実態を反映した高圧需要家モデルを構築し、シミュレーションにより SC を活用した既存技術の電力品質向上効果を適正に評価する。また、過剰な SC の抑制による電圧上昇抑制や、直列リアクトルの設置による高調波電圧抑制といった既知の電力品質向上効果のみではなく、SC を活用した電圧不平衡抑制などこれまで検討されていなかった電力品質向上手法を検討する。それにより、SC をさらに有効に活用し電力品質向上に結び付けていく。

(3) SC を活用した新しい電力品質向上方策の提案と検証

将来の配電システムにおいては、システム全体を考慮した SC の最適配置や制御による電力品質の最適化等の手法が必要と考えられる。それには、配電システムを運用する電力会社と配電システムに接続される個々の需要家が、従来のようにそれぞれの考えに基づき設備を構築していくのではなく、両者が協調して配電システムの電力品質向上を実現し、それにより得られるメリットを両者が享受するという考え方が不可欠である。このような考え方に

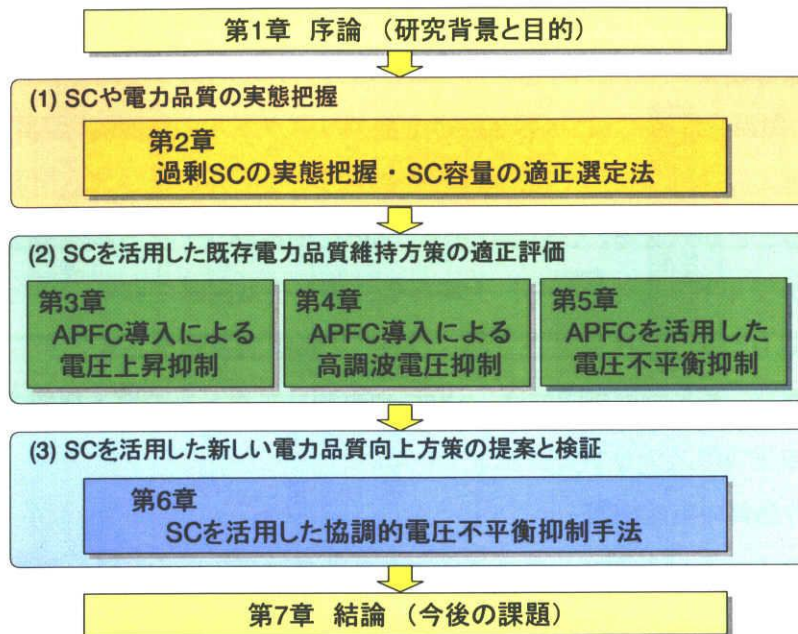


図 1.6 本論文の構成と各章の位置づけ

Fig.1.6 Components and relations of each chapter of this paper

より SC にさらなる付加価値を与えることで、適正な SC 設備の普及を促進し、電力品質向上に結び付けていく。

1.3 本研究の目的と内容

本研究では、配電システムの電力品質に多大な影響を与える高圧需要家の SC に着目する。まず、SC や電力品質の実態把握の観点から、高圧需要家における SC の使用実態や電力品質の実態把握と SC 容量選定法の見直しを行う。次に、SC を活用した既存技術の適正評価の観点から、実態に合った高圧需要家モデルの提案、提案モデルを用いた APFC の導入による電圧上昇、配電損失、高調波電圧の抑制効果の定量評価、電圧不平衡を抑制する SC 制御手法の検討を行う。最後に、SC を活用した新しい電力品質向上方策の提案の観点から、将来的な配電システムを想定し配電系統と高圧需要家が協調した電圧不平衡抑制手法を提案する。本論文の構成を図 1.6 に示し、以下に各章の内容を概説する。

第 2 章では、高圧需要家における過剰な SC の実態を実測調査により明らかにする。現在、一部の配電系統で発生している電圧上昇が、高圧需要家の過剰な SC に起因するといわれて

いることを踏まえ、様々な種類の高圧需要家において実測調査を実施し、得られたデータを用いて受電点や使用される負荷機器の力率の実態を明らかにすることによって、SCが過剰となる傾向にあることを示す。そして、過剰なSCが設置されるのを防ぐ対策として、実測結果に基づいた適正なSC容量の選定手法を提案する。さらに、提案手法を用いた場合の配電系統の電圧上昇抑制効果と配電損失低減効果を定量的に評価し、提案手法の有効性を検証する。

第3章では、高圧需要家のSCへのAPFC導入による電圧上昇抑制効果に着目する。第2章では適正なSC容量の選定手法を提案するが、容量が適正であっても全容量が常時投入されていると軽負荷時の受電力率が過度な進みとなる。その対策としてAPFCを導入することが望ましいがその普及率は低いのが現状である。そこで高圧需要家へのAPFCの導入促進に向けた具体的な方策の検討へ繋げることを目的とし、高圧需要家のSCへのAPFC導入効果を定量的に明らかにする。そのために、第2章の実測結果を踏まえ、実態に合った高圧需要家及び配電系統の評価モデルを提案する。そして提案モデルを用いたシミュレーションにより、高圧需要家のSCにAPFCを導入した場合の、配電系統の電圧上昇抑制効果ならびに配電損失低減効果を定量的に明らかにする。

第4章では、高圧需要家のSCへのAPFC導入による高調波電圧抑制効果に着目する。高圧需要家のSCにAPFCを導入する場合、SC投入時の突入電流抑制のために6%の直列リアクトルも同時に設置されることから、第5調波を中心とした高調波電圧の抑制が期待できる。そこで、まず実測調査により高圧需要家の高調波の実態を把握し、得られたデータを用いて実態に合った高圧需要家の高調波発生モデルを提案する。そして提案モデルを用いたシミュレーションにより、高圧需要家のSCにAPFCを導入した場合の、配電系統の高調波電圧低減効果を定量的に明らかにする。

第5章では、高圧需要家のSCやAPFCを活用した新たな電力品質向上方策として、電圧不平衡抑制を可能とするSC制御手法を検討する。電圧不平衡については、設備設計時の対策が内線規程に示されているが、負荷稼動時の不平衡の実態はこれまでほとんど明らかとなっていない。そこで、まず高圧需要家の実測調査により電圧や電流の不平衡の実態を明らかにする。そしてSC制御手法として、従来から行われている三相一括で力率を調整する手法に対して、相毎に力率を調整する手法を提案し、両者を用いた場合における配電系統の電圧不平衡の差異をシミュレーションにより明らかにすることで、提案手法が電圧不平衡抑制に効果があることを示す。

第6章では、第5章で検討したSC制御手法を発展させるとともに、将来的な配電システムの運用形態を想定し、電力会社と各高圧需要家が協調した電圧不平衡抑制手法を提案す

る。具体的には、APFCがSCの台数制御で無効電力調整をしていることに着目し、高圧需要家に単相SCを導入しそれらの台数制御により配電系統の電圧不平衡を抑制する手法を提案する。さらに提案手法を、同一配電系統上の複数の高圧需要家に導入し、相互に必要な情報をやり取りしながら協調的にSC容量を制御することで、配電系統全体の電圧不平衡を抑制する協調制御手法を提案する。そしてシミュレーションにより提案手法の有効性を検証する。

第7章では、本論文で得られた成果と今後の課題と将来展望について述べる。

1.4 結言

本章では、配電システムにおける電力品質の課題を整理するとともに、電力品質に影響を与える高圧需要家のSCの設計手法と現状の課題を述べ、本研究の意義と目的を明確にした。以降では、SC容量の適正選定手法、APFCの導入による電圧上昇と高調波電圧の抑制効果の定量評価、APFCを活用した電圧不平衡抑制手法、SCを活用した協調的電圧不平衡抑制手法について述べる。

第1章 参考文献

- (1) 雪平謙二：「電力品質とその限度値」，電気設備学会誌, Vol.25, No.10, pp.767-771 (2005)
- (2) 井上 彬：「高調波による障害事例と設備側での対策」，電気設備学会誌, Vol.25, No.10, pp.772-775 (2005)
- (3) 石川忠夫：「分散型電源の電力系統連系技術の最新動向」，電学論B, Vol. 126, No. 10, pp.964-968 (2006)
- (4) 浅野浩志：「需要家サイドから見た新しいエネルギーシステムの可能性」，電学論B, Vol. 124, No. 1, pp.3-6 (2004)
- (5) 小林広武：「新しい配電ネットワーク技術の開発動向と課題」，電学論B, Vol. 124, No. 4, pp.517-520 (2004)
- (6) 奈良宏一，長谷川淳：「新しい柔軟な電気エネルギー流通システム」，電学論B, Vol. 117, No. 1, pp.47-53 (1997)
- (7) 地球環境を考慮した電気設備調査研究委員会：「地球環境を考慮した電気設備 ～電気設備から見た地球環境負荷削減の基本知識～」，電気設備学会 (2003)
- (8) 配電系統電力品質技術専門委員会：「配電系統における電力品質の現状と対応技術」，電気協同研究, 第 60 巻, 第 2 号, pp.13-17 (2005)
- (9) 電気事業法 (昭和 39 年 7 月 11 日法律第 170 号), 第 26 条第 1 項
- (10) 電気事業法施行規則, (平成 7 年 10 月 18 日通商産業省令第 77 号), 第 44 条
- (11) 配電系統電力品質技術専門委員会：「配電系統における電力品質の現状と対応技術」，電気協同研究, 第 60 巻, 第 2 号, p.16 (2005)
- (12) 電気設備の技術基準の解釈, 第 260 条
- (13) 内線規程専門部会：「内線規程 JEAC 8001-2005」，日本電気協会, p.31 (2005)
- (14) 高調波対策専門委員会：「電力系統における高調波とその対策」，電気協同研究, 第 46 巻, 第 2 号, p.9 (1990)
- (15) 原子力安全・保安院：「高圧又は特別高圧で受電する需要家の高調波抑制対策ガイドライン」(2004)
- (16) 日本工業規格：JIS C61000-3-2「電磁両立性－第 3-2 部：限度値－高調波電流発生限度値 (1 相当りの入力電流が 20A 以下の機器)」(2005)
- (17) 配電系統電力品質技術専門委員会：「配電系統における電力品質の現状と対応技術」，電気協同研究, 第 60 巻, 第 2 号, pp. 188-201 (2005)

- (18)資源エネルギー庁パンフレット：「日本のエネルギー2006」，
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/energy-in-japan/energy2006html/newenergy.html>
- (19)総合資源エネルギー調査会需給部会「2030年のエネルギー需給展望」，資源エネルギー
庁 (2005)
- (20)高調波問題検討委員会：「高調波技術マニュアル」，電気安全環境研究所，p.11(2001)
- (21)小林 浩：「高調波対策の基本的な考え方」，生産と電気，Vol.54，No.9，pp.3-7(2002)
- (22)浅野雅彦：「配電系統の高調波問題と対策」，電気設備学会誌，Vol.24，No.4，pp.254-257
(2004)
- (23)中国電力株式会社標準料金表 平成 18 年 7 月 1 日実施
- (24)電気書院編集部：「フィールドエンジニアライブラリー 力率調整テクニック」，電気書
院，pp.3-7(1985)
- (25)日本規格協会：「JIS ハンドブック電気 設備工事編」，p.1125 (2000)
- (26)日本電設工業会：「新編・新人教育電気設備増補版」，オーム社，p.178 (1987)
- (27)経済産業省：「工場又は事業場におけるエネルギーの使用の合理化に関する事業者の判
断の基準」(2003)
- (28)高圧受電設備高調波対策専門委員会：「高圧受電設備における高調波問題の現状と対策」，
電気協同研究，第 54 巻，第 2 号，pp. 77-78 (1998)
- (29)国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課：「建築設備設計基準 平成 18 年度版」，公
共建築協会・全国建設研修センター，pp.97-103(2006)
- (30)需要設備専門部会：「高圧受電設備規程」，日本電気協会，JEAC8011-2008，pp.56-57(2008)
- (31)原 英喜：「高圧受電設備における進相コンデンサ容量と自動力率調整装置導入の実態」，
電気設備学会誌，Vol.26，No.6，pp.409-412 (2006)

第 2 章

高圧需要家における

進相コンデンサ容量の適正選定法

2.1 緒言

配電システムにおける電力品質の中で近年新たな問題として浮上してきた電圧上昇は、主たる要因が高圧需要家の過剰な進相コンデンサ（以下、SC とする）によるフェランチ現象である⁽¹⁾。最近の負荷機器には、ポンプ・ファン等の動力設備から蛍光灯照明器具等の照明設備にまで幅広くインバータ制御機器が使用されており⁽²⁾、これらの機器では基本波の力率は 1 に近い⁽³⁾。それにも関わらず、SC 容量を三相変圧器容量の 3 分の 1 程度に選定する手法（以下、3 分の 1 ルールとする）で選定していることが、SC 容量が過剰になってしまう要因であると考えられる。

また、現実には将来の負荷増加等を見込んで変圧器容量を設計時の負荷容量に対して大きめに選定することが多い。さらに、負荷機器は必ずしも定格状態で稼働するとは限らない。よって、結果的に変圧器需要率（＝最大負荷電力／変圧器容量）は低くなるため、変圧器容量を基準に選定する 3 分の 1 ルールでは、SC 容量が過剰に選定されることになる。

さらに、現状では高圧需要家の約 5% しか SC に自動力率調整装置（以下、APFC とする）を設置していないことから⁽⁴⁾、夜間や休日等の軽負荷時にも、重負荷時と同程度の容量の SC が配電系統に接続されたままとなり、さらなる電圧上昇を招いている⁽⁵⁾。

このような問題が解決されるためには、多くの高圧需要家に APFC が積極的に導入されることが望ましいが、実際には経済性の観点から APFC の普及は進んでいない。このような現状を踏まえると、配電系統の電圧上昇抑制対策として取りうる実際的な解決法は、負荷機器の力率や設備稼働後の変圧器負荷率の実態に合わせた適正な SC 容量を選定することである。しかしながら、高圧需要家の SC 容量や力率の実態に関するデータはこれまでほとんど報告されておらず、適正な SC 容量をどの程度に選定したらよいかについてのガイドラ

表 2.1 実測対象需要家の概要

Table 2.1 The outline of measured consumers

項目	内容
対象軒数	30 軒 製造業(FA)：6 軒，事務所(OB)：14 軒 店舗(SH)：3 軒，病院(HS)：3 軒 学校(SC)：2 軒，ホテル(HT)：2 軒
設備容量	250kVA ～ 6400kVA (平均 1160kVA)
自動力率調整	あり 13 軒，なし 17 軒
調査年度	1995～1997 年，2004～2005 年

インは明確となっていない。

そこで本章では、様々な種類の高圧需要家における実測調査により受電点や負荷機器の力率の実態を明らかにした。そして、過剰な容量の SC が設置されるのを防ぐ対策として、実測結果に基づいた適正な SC 容量の選定手法を提案する。さらに、提案手法を用いた場合の配電系統の電圧上昇抑制効果と配電損失低減効果を定量的に評価し、提案手法の有効性を検証した。

2.2 高圧需要家における力率の実測

2.2.1 実測方法

高圧需要家の負荷機器や SC 容量の実態を把握するため、30 軒の需要家の受電点において実測を行った。実測対象需要家は、業種毎の特徴を把握するために、製造業、事務所、店舗、病院、学校、ホテルの 6 業種から選定した。事務所は高圧需要家全体の中でも軒数比率が多いことから 14 軒を選定した。これらの需要家は、力率調整方法により APFC がある場合（13 軒）とない場合（17 軒）に分けて分析した。実測対象需要家の概要を表 2.1 に示す。

2.2.2 力率の評価方法

高圧需要家が SC を設置し、力率改善を行う主な目的は、電力料金の力率割引を受けるためである。よって本章では、電力料金の力率割引制度上の定義と同様に、8 時～22 時までを昼間、それ以外の時間帯を夜間とし、各時間帯での有効電力量と無効電力量から、次の 2

表 2.2 測定方法

Table 2.2 The methods of measurement

項目	内容
測定箇所	受電点, 変圧器 2 次側(一部)
測定項目	電圧, 電流, 有効電力, 無効電力, 力率
測定時期	夏季(7~9 月), 中間季(10~12 月)
測定期間	連続 1~2 週間
測定間隔	5 分毎または 10 分毎に瞬時値を測定

種類の力率を算出し評価した。なお、有効電力量と無効電力量は、5 分毎または 10 分毎の瞬時電力を積算して求めた。

(1) 受電平均力率

受電平均力率とは高圧需要家の受電点における力率割引制度上の力率であり、SC を含む需要家全体の力率を表す。受電平均力率 PF_R は、受電有効電力量 P_R と受電無効電力量 Q_R を用いて、(2.1)式により算出した。

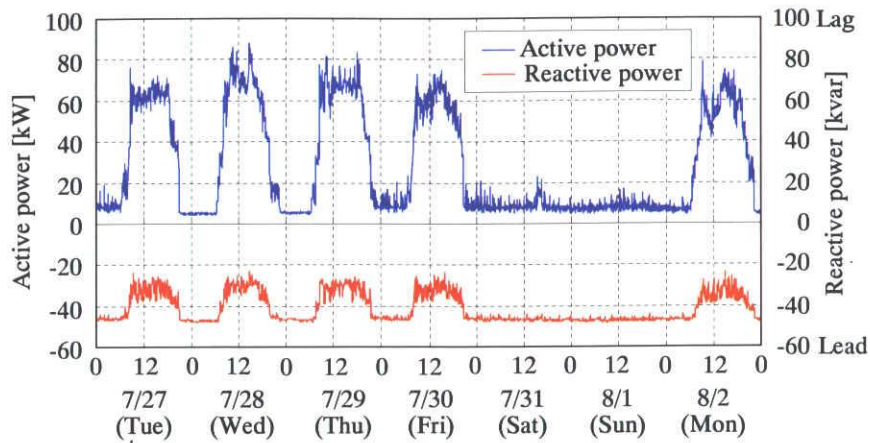
$$PF_R = \frac{P_R}{\sqrt{P_R^2 + Q_R^2}} \quad (2.1)$$

例えば夏季の PF_R は、夏季に測定した 5 分毎または 10 分毎の有効電力と無効電力をすべて積算して P_R , Q_R を求めたうえで(2.1)式を用いて求めた。なお、実際の力率割引制度上の力率は、 Q_R が進みの場合にはゼロとして計算されるが、本章では進みの程度を把握することを目的とし、 Q_R が進みの場合にも進み無効電力量として考慮した。

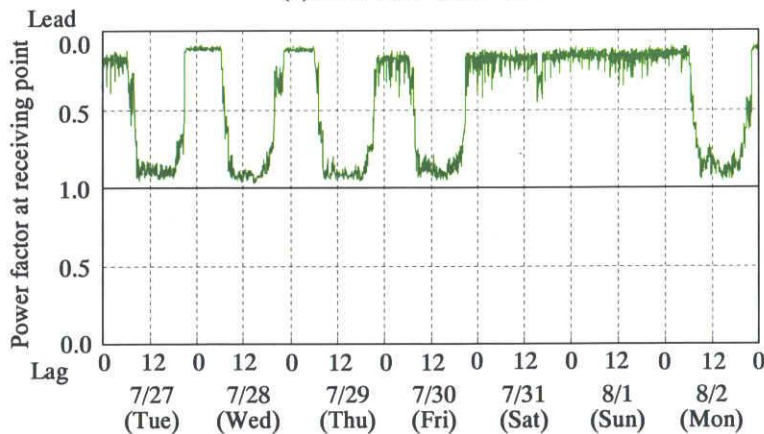
(2) 負荷平均力率

負荷平均力率とは需要家構内で使用される負荷機器全体の力率を、力率割引制度上の定義で求めたものである。これにより 3 分の 1 ルールで想定された負荷機器の力率との差異を確認した。負荷平均力率 PF_L は直接実測することは困難であるため、受電無効電力量 Q_R から SC の無効電力量 Q_{SC} を差し引いたものを負荷機器全体の無効電力量として、(2.2)式により算出した。

$$PF_L = \frac{P_R}{\sqrt{P_R^2 + (Q_R - Q_{SC})^2}} \quad (2.2)$$



(a)有効電力・無効電力



(b)力 率

図 2.1 自動力率調整がない需要家における実測例

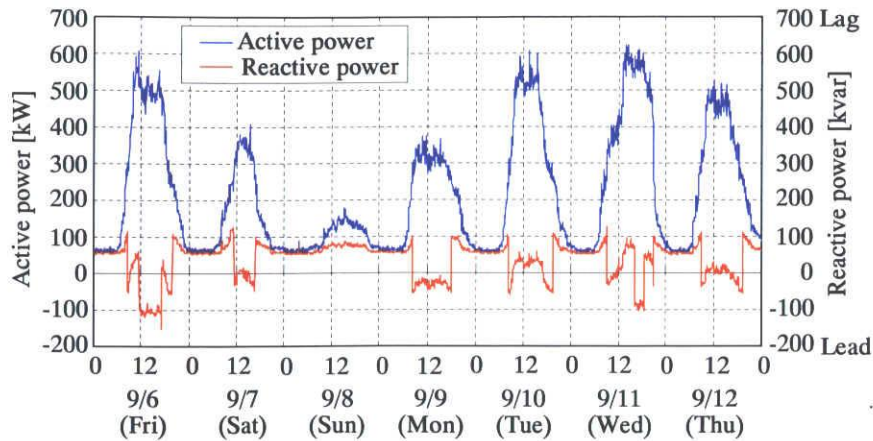
Fig. 2.1 Trend of active power, reactive power and power factor at receiving point of HV consumer without APFC

2.2.3 受電点に関する実測結果

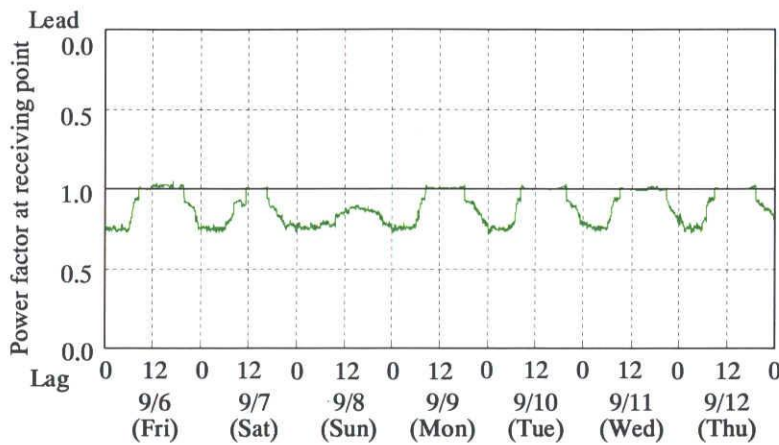
(1) 有効電力・無効電力・力率の時間推移

実測結果の例として、APFCがない需要家(OF-01)の受電点における有効電力・無効電力・力率の1週間の時間推移を図2.1に示す。

有効電力が小さい夜間では、力率は進み 0.1~0.2 となっている。これは、有効電力が小さくてもSC容量は昼間と同じであるためである。一方、有効電力が大きい昼間でも進み 0.8~0.9 である。図2.1は夏季の実測データであるため、昼間の有効電力はこの需要家の年間の最大値に近いものと考えられる。それにも関わらず力率が進みであることから、この需要家ではSC容量をさらに削減できる。



(a)有効電力・無効電力



(b)力 率

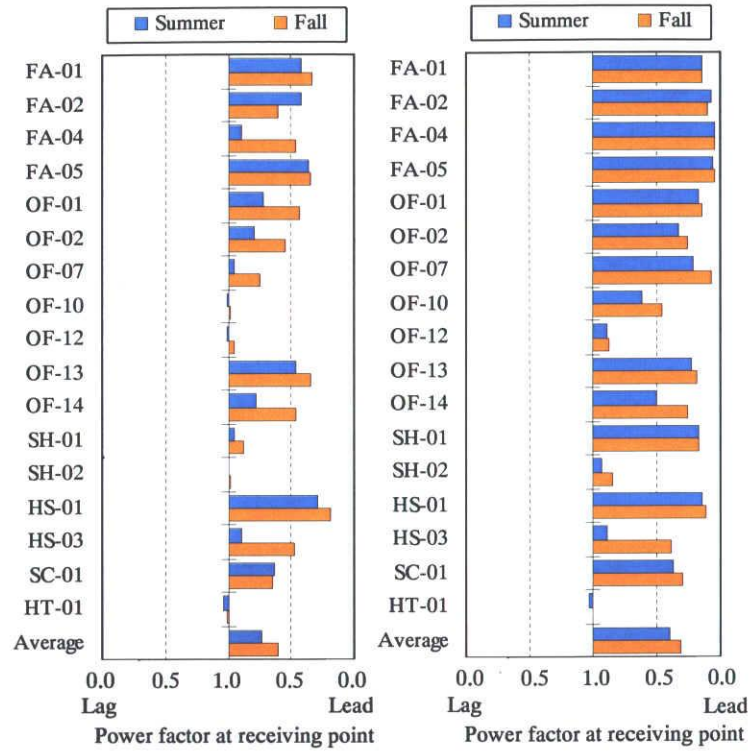
図 2.2 自動力率調整がある需要家における実測例

Fig. 2.2 Trend of active power, reactive power and power factor at receiving point of HV consumer with APFC

次に APFC がある需要家(OF-06)の受電点における有効電力・無効電力・力率の 1 週間の時間推移を図 2.2 に示す。有効電力が大きい昼間では、有効電力の値に応じて無効電力が不連続に変化していることが分かる。これは APFC により高圧側に設置された SC バンクが台数制御されているためである。このように APFC の効果により昼間の力率はほぼ 1 に維持されていることが分かる。

(2) 受電平均力率

実測した 30 軒のうち、APFC がない需要家 17 軒の受電平均力率を、昼間と夜間に分けて、図 2.3(a)と(b)にそれぞれ示す。図 2.3(a)の昼間の平均値は、夏季では進み 0.74、中間季では

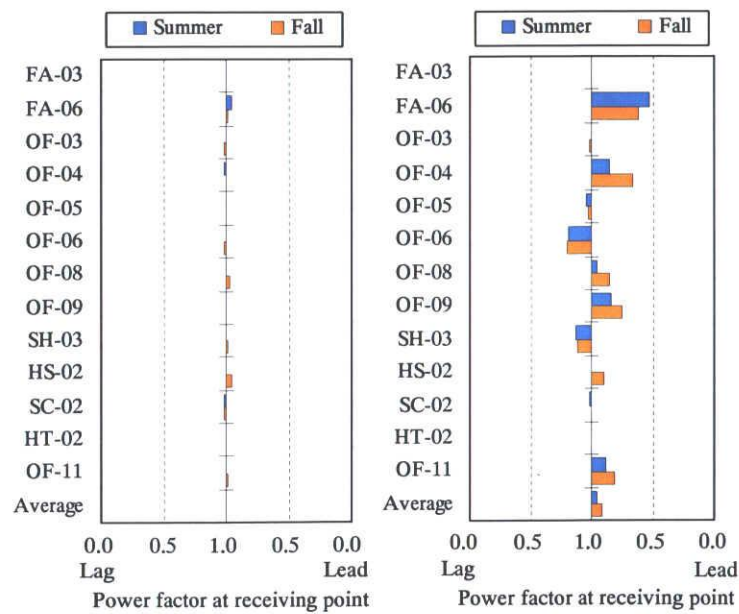


(a) 昼間

(b) 夜間

図 2.3 自動力率調整がない需要家における受電平均力率

Fig. 2.3 Average power factor at receiving point of HV consumer without APFC



(a) 昼間

(b) 夜間

図 2.4 自動力率調整がある需要家における受電平均力率

Fig. 2.4 Average power factor at receiving point of HV consumer with APFC

進み 0.61 であった。また、17 軒のうち 13 軒が夏季または中間季において進み 0.9 よりも進みとなっていた。図 2.3(b)の夜間の平均値は、夏季では進み 0.40、中間季では進み 0.32 であった。また、17 軒のうち 14 軒が夏季または中間季において進み 0.5 よりも進みとなっていた。また、昼間の受電平均力率が 1.0 に近い需要家 OF-10、OF-12、SH-02 も、夜間には進みとなっている。よって、これらの需要家も夜間における配電系統の電圧上昇の一因となりうるため、できる限り SC 容量を削減することが望ましい。このように、APFC なし需要家では、受電平均力率が夏季、中間季ともに昼間に進みである場合が多く、夜間にはさらに進み傾向であることがわかる。

これに対して、APFC がある需要家 13 軒の受電平均力率を、昼間と夜間に分けて、図 2.4(a) と(b)にそれぞれ示す。図 2.4(a)より、すべての需要家で昼間の受電平均力率はおおむね 1.0 に調整されていることが分かる。このように、受電平均力率の実態から、APFC がない需要家では SC が過剰となっていることが明らかになった。

2.2.4 負荷に関する実測結果

(1) 負荷平均力率

次に、従来 3 分の 1 ルールを適用する際に想定していた負荷力率（遅れ 0.80）と、実際の負荷力率を比較するため、実測より求めた負荷平均力率の度数分布を図 2.5 に示す。全 60 データ（30 軒×2 季節）の平均は遅れ 0.91 であった。また、遅れ 0.80 以上の需要家が全体の 90% 近く(52 データ)を占めている。なお、図 2.5 において、遅れ 0.85 より遅れ側にあるデータは、すべて製造業の需要家であった。これは、生產品目の違いによる負荷機器の差異や、実測対象需要家の竣工年度のバラつきによると考えられる。

(2) 変圧器別負荷平均力率

3 分の 1 ルールは三相変圧器容量を基準値として適用されている。図 2.5 の負荷平均力率は三相負荷と単相負荷を区別せずに求めたものである。そこで、実測対象需要家の中で、三相変圧器と単相変圧器を個別に実測したデータに対して、それぞれに負荷平均力率と同じ定義の力率を算出した結果を図 2.6 に示す。平均値は、三相変圧器が遅れ 0.90、単相変圧器が遅れ 0.97 で単相変圧器の方がよく、分布を見ても単相変圧器と三相変圧器では力率に差が見られた。この結果から、3 分の 1 ルールの基準である三相変圧器の力率は遅れ 0.80 よりもよいことと、より受電力率を 1 に近くする SC 容量を選定するには三相変圧器と単相変圧器を区別したほうがよいことがわかる。

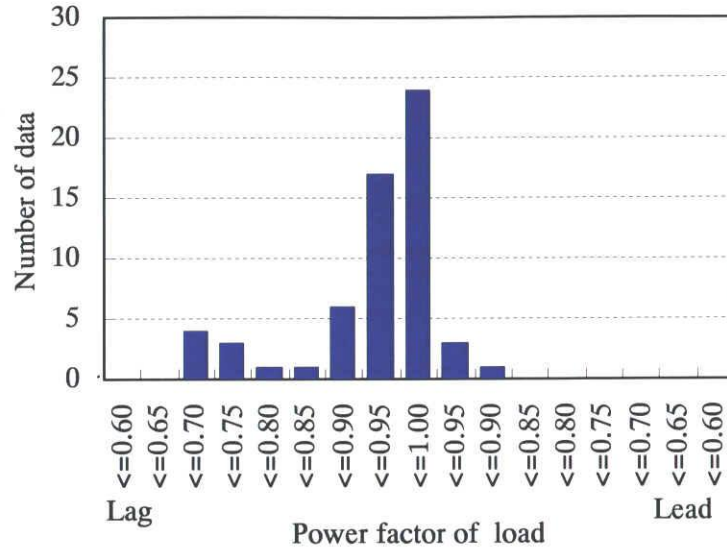


図 2.5 負荷平均力率

Fig. 2.5 Histogram of average power factor of loads

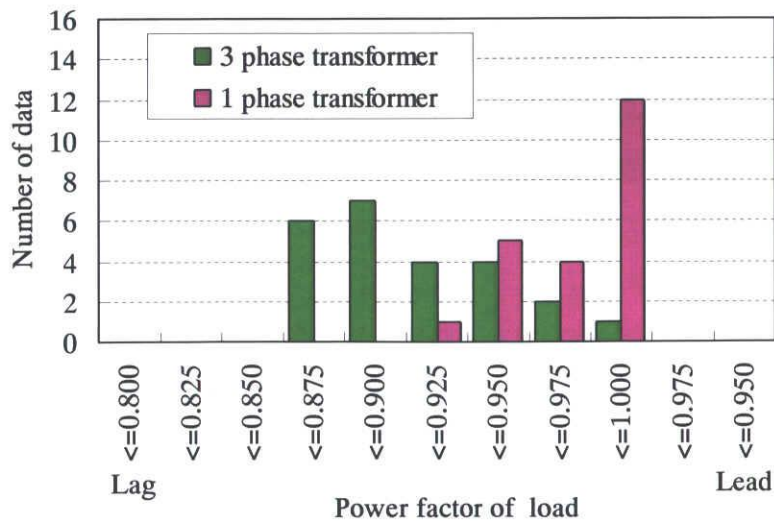


図 2.6 変圧器毎の負荷平均力率

Fig. 2.6 Histogram of average power factor of transformer

2.3 適正な進相コンデンサ容量の選定法

2.3.1 進相コンデンサ容量選定法の見直しの必要性

2.2 節で示した実測結果をもとに、APFC が設置されていない需要家において、どの程度の SC 容量が削減可能であるかを電力料金体系に基づいて検討し、SC 容量選定法の見直しの必要性について考察した。

電力料金の力率割引制度において、割引率を最大とするために必要な最小の SC 容量を、「最小 SC 容量」と定義する。現状では、受電平均力率が遅れ 0.995 より大きくなれば、力率割引制度上の力率は 1 となり割引が最大（85%）となる。従って、最小 SC 容量を受電平均力率が遅れ 0.995 となる SC 容量とする。そこで、この最小 SC 容量を実測対象需要家毎に算出し、その結果を実際に投入されている SC 容量（以下、実 SC 容量とする）、および設置はされているが投入されていない SC 容量（以下、未使用 SC 容量とする）と合わせて図 2.7 に示す。ここで図 2.7 横軸の数値は、3 分の 1 ルールと比較するために、SC 容量の三相変圧器容量に対する比率を表している。実 SC 容量から最小 SC 容量を差し引いた容量が、需要家毎の過剰な SC 容量である。なお、需要家 OF-13 および HS-01 は、負荷平均力率が遅れ 0.995 を上回っているため、最小 SC 容量はゼロである。

図 2.7 では、APFC なしの需要家 17 軒のうち 13 軒で最小 SC 容量が実 SC 容量よりも小さくなっており、SC 容量を削減できることがわかる。また、これ以外の 4 軒の需要家のうち、OF-10 および OF-12 には未使用 SC 容量があるが、これは設備設計時に選定された SC 容量が過剰であったことを意味している。さらに、HT-01 では単相変圧器容量が三相変圧器の 4 倍と大きいにも関わらず、3 分の 1 ルールで SC 容量が選定されていたため、結果として SC 容量不足となっている。これらの結果から、17 軒のうち 16 軒の需要家において、設備設計時における SC 容量の算出法を見直す必要があることがわかる。

次に、実測対象需要家 30 軒に対して、最小 SC 容量と変圧器合計容量の比率を求めた結果の度数分布を図 2.8(a)に示す。また同様に最小 SC 容量と三相変圧器合計容量の比率を求めた結果を図 2.8(b)に示す。図 2.8(a)より累積度数分布 90%となる容量比率は 20%以下であった。これに対し、図 2.8 (b)では容量比率や分布形状のバラつきが大きくなっている。以上の結果は、変圧器容量を基準に SC 容量を選定する場合には、従来の 3 分の 1 ルールのように三相変圧器容量のみを基準とするのではなく、単相変圧器容量も加味した方が適正な容量を選定できることを示唆している。

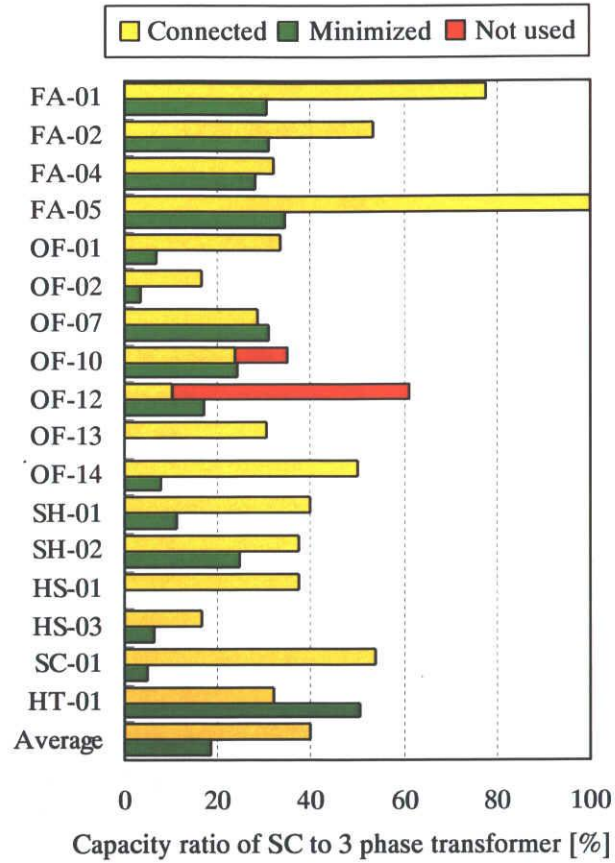
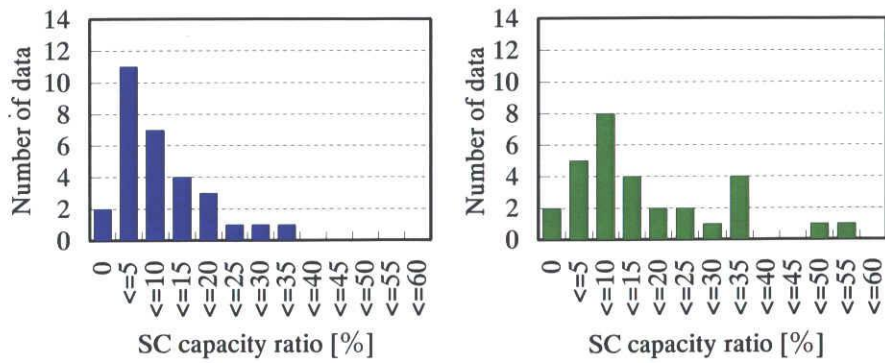


図 2.7 実 SC 容量と最小 SC 容量

Fig. 2.7 Amount of actual SC and minimized SC



(a) 対総合計容量

(b) 対三相合計容量

図 2.8 最小 SC 容量と変圧器容量の比率

Fig.2.8 Histogram of ratio of minimized SC and transformer

2.3.2 適正な進相コンデンサ容量の選定法

APFCの設置されていない需要家に対して、2.3.1項で定義した最小SC容量を選定すれば、力率割引制度上の割引率を最大としたままSC容量を最小化できる。しかし、最小SC容量の選定には、個々の需要家の負荷機器すべてが通常状態で稼働しているときの実測データが必要となる。したがって、設備設計段階では最小SC容量を適正に決定することは困難である。そこで本項では、負荷力率の実測結果に基づいて、設備設計段階においてガイドラインとなる適正SC容量の算出法を提案する。

2.3.1項の結果を受けて、本節では、単相変圧器と三相変圧器を区別してSC容量を設定する。単相変圧器と三相変圧器の負荷平均力率をそれぞれ $\cos\theta_1$ 、 $\cos\theta_3$ とし、改善目標とする力率を $\cos\theta$ とする。また単相変圧器と三相変圧器の負荷有効電力をそれぞれ P_1 、 P_3 とし、必要な負荷1kWあたりのSC容量をそれぞれ q_1 、 q_3 とする。このとき、必要なSC容量の合計 Q は(1.7)式より次のように表現できる。

$$q_1 = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_1} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta} - 1} \quad (2.3)$$

$$q_3 = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_3} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta} - 1} \quad (2.4)$$

$$Q = q_1 \times P_1 + q_3 \times P_3 \quad (2.5)$$

ここで、各変圧器の負荷有効電力は、設備設計段階では負荷設備容量の合計値に対して、需要率、不等率などを加味して予測した値を使用することが望ましい。あるいは、負荷有効電力を正確に予測することが困難な場合には、従来の方法にならって変圧器容量と需要率を用いて、(2.5)式は次のように置き換えることも可能である。

$$Q = q_1 \times \alpha_1 S_1 + q_3 \times \alpha_3 S_3 \quad (2.6)$$

ここで、 S_1 、 S_3 ：単相、三相の各変圧器容量

α_1 、 α_3 ：単相、三相の各変圧器需要率

$\cos\theta$ は最小SC容量の考え方に基づき遅れ0.995とする。また、 $\cos\theta_1$ 、 $\cos\theta_3$ は、負荷機器の仕様等により明確であればその値を使用すればよいが、通常設備設計では負荷機器の種類や数量が多く不明確な場合が多い。そこで実用上は、各種負荷機器の力率のデータベースなどから予め試算しておくことが望ましい。

ここでは、2.2.4項での実測結果をもとに $\cos\theta_1$ 、 $\cos\theta_3$ を定め、 q_1 、 q_3 を算出する。具体

的には、図 2.6 において実測データ数の 90%以上を満たす力率値を採用することとし、 $\cos \theta_1 = 0.93$ 、 $\cos \theta_3 = 0.86$ とする。さらに $\cos \theta = 0.995$ とし、これらを(2.3)～(2.6)式に代入すると、次のような SC 容量選定式が得られる。

$$Q = 0.3 P_1 + 0.5 P_3 \quad (2.7)$$

$$Q = 0.3 \alpha_1 S_1 + 0.5 \alpha_3 S_3 \quad (2.8)$$

(2.8)または(2.9)式を用いることにより、負荷力率の実態に合った SC 容量選定、および単相負荷容量が多い場合での適正な SC 容量選定が可能となる。

2.4 シミュレーションによる提案法の有効性の検証

2.4.1 シミュレーション内容

提案法により高圧需要家の SC 容量を選定した場合、配電系統の電圧上昇抑制効果および電力損失低減効果をシミュレーションにより検証した。具体的には、前者については、夏季や中間季、昼間や夜間等の条件において、配電系統末端の電圧を適正に維持できるかどうか、後者については、配電系統全体の電力損失をどの程度削減できるかを検証した。

2.4.2 シミュレーション方法

シミュレーションは図 2.9 に示した配電系統モデルにより行った。線路の総こう長は 10km とし、需要家軒数は中部電力管内の高圧需要家数や変電所数等から平均的な値を求め 13 軒とした。配電系統の設定条件を表 2.3 に示す。

図 2.9 の配電系統モデルを使用し、従来の選定法（以下、従来法とする）により SC を設置した場合と、2.3.2 項で提案した新しい選定法（以下、提案法とする）により設置した場合の、配電系統各所の電圧と配電損失を比較した。比較は、夏季と中間季及び昼間と夜間を組み合わせた 4 条件の下で行った。各条件における高圧需要家受電点の負荷電力と力率の設定条件を表 2.4 に示す。シミュレーションでは、APFC の導入率が低い場合を想定して、需要家はすべて APFC なしとした。また、すべての需要家の負荷電力は、実測対象需要家 30 軒の平均値とした。一方、受電力率については、従来法では調査対象需要家のうち APFC がない需要家の平均値を採用し、提案法では、調査対象需要家の平均的な単相、三相負荷電力比率や変圧器需要率を加味した上で、2.3.2 項で提案した新しい選定法により SC 容量を選定した場合の値を適用した。単相負荷は各相にバランスして配置されているものとし、三相平衡回路として計算した。変電所の送り出し電圧は 6600V とした。

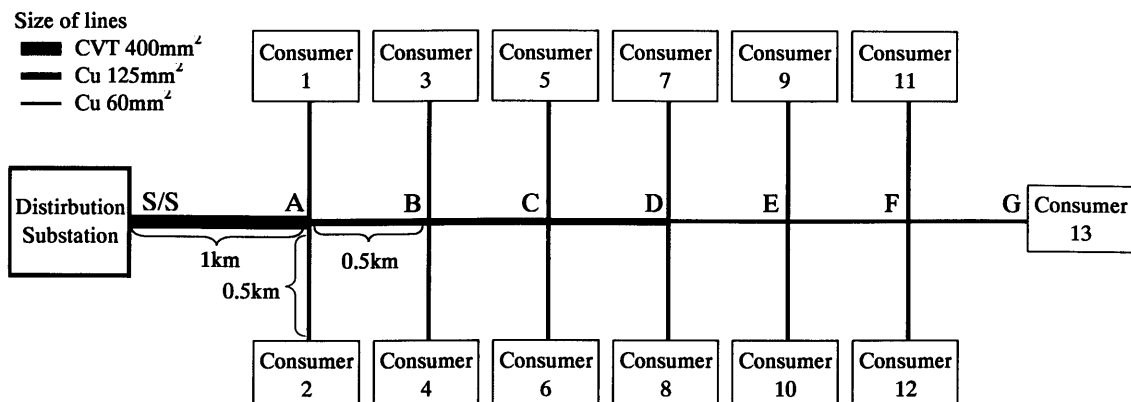


図 2.9 想定した配電システムモデル

Fig. 2.9 Calculation model of distribution system

表 2.3 シミュレーションにおける配電システム条件

Table 2.3 Conditions of distribution system

項目	内容
線路総こう長	10km
高圧需要家軒数	13 軒
線路インピーダンス	CVT400mm ² : 0.047+j0.111 Ω/km Cu 125mm ² : 0.149+j0.381 Ω/km Cu 60mm ² : 0.313+j0.409 Ω/km

表 2.4 シミュレーションにおける需要家条件

Table 2.4 Conditions of consumers

条件		負荷電力 [kW/1 軒]	受電力率	
			従来法	提案法
夏季	昼間	218	0.75(進み)	1.00(進み)
	夜間	101	0.40(進み)	0.88(進み)
中間季	昼間	146	0.64(進み)	0.97(進み)
	夜間	71	0.34(進み)	0.73(進み)

2.4.3 シミュレーション結果

夏季および中間季における配電系統各箇所の電圧を図 2.10 と図 2.11 にそれぞれ示す。図中の横軸は、図 2.9 の配電系統モデル上の分岐点の記号を示している。図 2.10 と図 2.11 のいずれにおいても、従来法では需要家の受電点が進みとなっていることから電圧上昇が見られ、配電線末端における電圧上昇の大きさは夜間では 200V 以上に達している。しかし提案法では、中間季の夜間においても系統全体の電圧は 6600～6650V に維持されており、従来法と比較して電圧上昇を抑制できていることがわかる。

高圧需要家の受電点における供給電圧には明確な基準値はない。しかし、電気事業法第 26 条及び同法施行規則第 44 条の規定により、低圧需要家の供給電圧は、標準電圧 100V では $101 \pm 6V$ 、標準電圧 200V では $202 \pm 20V$ 以内に維持する必要があると規定されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。そこで、この基準値を 6600V に適用して柱上変圧器のタップを 6600V/105V として換算すると、5917～6723V となる。これを基準値として評価すると、配電系統の末端の電圧は、従来法では夏季昼間以外のすべての条件において、上限側の 6723V よりも大きくなっている。これに対し、提案法を用いた場合では、すべての条件において上限値以内に維持されている。

次に、配電損失の比較を図 2.12 に示す。提案法は、電力損失を従来法の 50% 以下に削減できていることがわかる。特に夜間での電力損失は、従来法の 20% 以下に削減できる。以上の結果から、提案手法により SC 容量を選定することで、電圧上昇の抑制と電力損失の削減が達成できることがわかった。

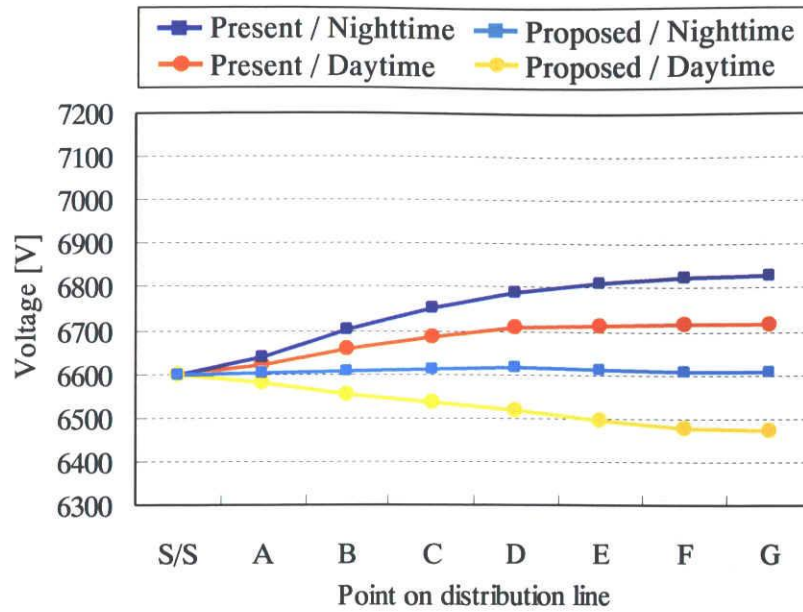


図 2.10 夏季における系統各箇所の電圧

Fig. 2.10 Voltage of distribution system in summer

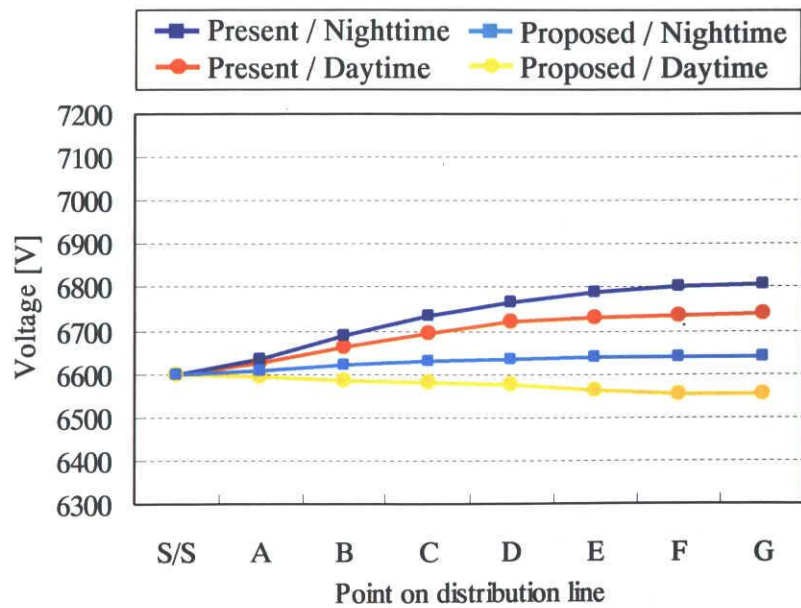


図 2.11 中間季における系統各箇所の電圧

Fig. 2.11 Voltage of distribution system in fall

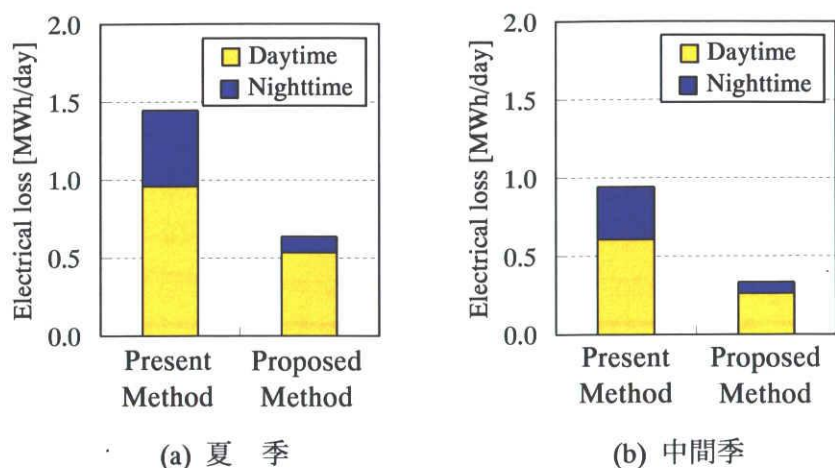


図 2.12 提案法の配電損失低減効果

Fig. 2.12 Effect of electrical loss reduction by proposed method

2.5 結言

本章では、高圧需要家 30 軒の実測調査により、受電点や負荷機器の力率の値から SC 容量の過剰な実態が明らかにした。そして、この実測結果を基に、過剰な容量の SC が設置されるのを防ぐ対策として、適正な SC 容量選定の選定法を提案した。さらに、提案法を用いた場合の配電系統の電圧上昇抑制効果と配電損失低減効果を定量的に評価し、提案法の有効性を検証した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) APFC がいない需要家では、受電平均力率の平均値が夏季で進み 0.74、中間季で進み 0.61 であり、過剰な容量の SC が常時投入されている。
- (2) 負荷平均力率の平均値は遅れ 0.91 であった。また、変圧器毎の負荷平均力率は、三相変圧器では遅れ 0.90、単相変圧器では遅れ 0.97 であり、これらはいずれも「3 分の 1 ルール」の前提の負荷力率である遅れ 0.80 に比べてよくなっている。
- (3) APFC がいない需要家において、最小 SC 容量の考え方で設備設計時の SC 容量選定法の見直しの必要性を検討したところ、17 軒中 16 軒で見直しが必要となった。
- (4) 三相変圧器と単相変圧器を区別した SC 容量選定法を提案し、実測結果を基にして具体的な選定式を導出した。
- (5) 提案した SC 容量選定法の有効性をシミュレーションにより評価し、配電系統の電圧上昇を適正に維持できることと、電力損失を従来法の 50% 以下に低減できること確認した。

第 2 章 参考文献

- (1) 電気協同研究会：「配電系統における電力品質の現状と対応技術」，電気協同研究，第 60 巻，第 2 号，pp.188-201 (2005)
- (2) 日本照明器具工業会：「蛍光灯器具のインバータ化率の年度推移」，日本照明器具工業会調査統計
- (3) 高圧受電設備の使用実態と進相コンデンサ容量の最適化に関する調査研究委員会：「高圧受電設備の使用実態と進相コンデンサ容量の最適化に関する調査研究報告書」，(社)電気設備学会中部支部，(2006)
- (4) 原：「高圧受電設備における進相コンデンサ容量と自動力率調整装置導入の実態」，電気設備学会誌，Vol.26，No.6，pp.409-412 (2006)
- (5) 電気協同研究会：「配電系統における電力品質の現状と対応技術」，電気協同研究，第 60 巻，第 2 号，p.44 (2005)
- (6) 電気事業法（昭和 39 年 7 月 11 日法律第 170 号），第 26 条第 1 項
- (7) 電気事業法施行規則，（平成 7 年 10 月 18 日通商産業省令第 77 号），第 44 条

第 3 章

高圧需要家への自動力率調整装置導入による 電圧上昇抑制

3.1 緒言

配電システムにおける電圧上昇問題の主たる要因が高圧需要家の過剰な進相コンデンサ（以下 SC とする）であるという背景のもと、第 2 章において高圧需要家の受電力率および負荷力率の実測調査結果から、SC 容量が過剰であり受電力率も過度に進みである高圧需要家が多いことを示した。また SC 容量の削減対策として実測に基づいた適正な SC 容量選定手法を提案し、その有効性を検証した。

SC 容量を適正に選定した場合でも、SC の全容量が常時投入されていると、軽負荷時において受電力率が過度な進みとなる可能性がある。そのためさらなる対策として、高圧需要家に自動力率調整装置（以下、APFC とする）を導入し、受電力率が 1 に近くなるように、負荷稼動状態に応じて SC 容量を適正に制御することが望ましい。しかしながら、高圧需要家における APFC の普及率は平均して 5% 程度と低いのが現状である⁽¹⁾。これは装置や開閉器のイニシャルコストが必要であるという経済的な理由もあるが、APFC の導入効果が必ずしも定量的に評価されていないことも一因である。すなわち、これまで配電系統計画の実務では、重負荷時に電圧が降下した際にも系統電圧が適正範囲を逸脱しないようにするため、高圧需要家の受電力率を遅れの値で一定とした評価モデルにて電圧計算を行い、設備形成を図ってきた。しかし、これまで第 2 章にて述べたような高圧需要家の実態調査が十分ではなく、その結果として軽負荷時における高圧需要家の受電力率を把握していなかったため、軽負荷時も重負荷時と同様に、高圧需要家の受電力率を遅れ一定とした実態とは異なった評価モデルにて電圧計算を行ってきた。この結果、軽負荷時の過度な進み力率による配電系統の電圧上昇等を定量的には評価していなかった。

しかし、SC 容量の削減対策である APFC の導入効果を、実態に合ったモデルで定量的に

評価することができれば、配電系統における電圧上昇による障害の発生防止の一助となる。さらに、電圧上昇抑制のための設備投資抑制や配電損失低減により生じるコスト削減効果を、APFC 導入促進のインセンティブに活用する等、電力システム全体としての導入促進方を具体的に検討することが可能となる。

そこで、本章では高圧需要家への APFC の導入促進に向けて、その具体的な方策の検討へ繋げることを目的とし、高圧需要家における APFC の導入が配電系統の電圧上昇や電力損失の抑制に寄与する効果の定量評価を行った。

まず、第 2 章の実測結果を踏まえ、実態に合った高圧需要家及び配電系統の評価モデルを提案した。そしてこれらの提案モデルを用いて、高圧需要家の SC に対して APFC を導入した場合の、配電系統の電圧上昇や電圧変動の抑制、及び配電損失や CO₂ 排出量を評価することにより、APFC 導入効果を定量的に明らかにした。

3.2 従来の評価モデルの課題

配電系統の計画や運用の実務では、系統各所の電圧が許容値を逸脱しないように、配線サイズを決定したり、SVR 等の電圧調整装置を配置する必要がある。そのため、配電線のインピーダンスや高圧需要家の想定負荷等のデータをもとに、系統各所の電圧計算を行う。配電用変電所の変圧器バンクの 1 フィーダにおける送り出し点から末端までの電圧の計算手順は、おおむね次のとおりである。

まず、配電系統に接続されるすべての高圧需要家を電流源モデルで表し、すべての高圧需要家の受電力率が同じであると仮定する。そして対象フィーダの送り出し電流値を、重負荷時や軽負荷時等の場合を想定して計算条件として与える。次に、系統各所の電流を想定した送り出し電流値を高圧需要家の契約電力で案分することにより求めていく。そして、求められた電流値に配電線インピーダンスを乗じて送り出し点からの電圧変化を計算する。

この計算手法において、これまで高圧需要家の受電力率は、業種や負荷稼働状況等の条件とは無関係に遅れ 0.95 で一定とされていた。しかしながら、軽負荷時には高圧需要家の多くで受電力率が進みである実態を考慮すると、力率を遅れの値で一定とするこれまでの計算手法を現状の配電系統で使用すると、実態との差が大きくなると考えられる。よって、高圧需要家の受電力率を実態に合わせた評価モデルが必要である。

またフェランチ現象による電圧上昇は夜間等の軽負荷時に大きくなることが多いため、時間帯に応じて高圧需要家の電力や力率の条件が決定される評価モデルが必要である。

3.3 実態に合った評価モデルの検討

3.3.1 高圧需要家における電力と力率の関係

実態に合った評価モデルを構築するため、第 2 章にて実測した高圧需要家の受電点における電力や力率等のデータを用い、高圧需要家の有効電力と無効電力、及び有効電力と力率の関係を分析した。本論文では、電力料金制度上の力率の定義に基づき、力率を次式より算出し評価した。なお、実測対象需要家の概要や測定項目等の実測調査内容は 2.2.1 項に、及び力率算出方法の詳細は 2.2.2 項にそれぞれ示してある。

$$PF_R = \frac{P_R}{\sqrt{P_R^2 + Q_R^2}} \quad (3.1)$$

$$P_L = P_R \quad (3.2)$$

$$Q_L = Q_R - Q_{SC} \quad (3.3)$$

$$PF_L = \frac{P_L}{\sqrt{P_L^2 + Q_L^2}} \quad (3.4)$$

ここで、 PF_R ：受電力率， PF_L ：負荷力率

P_R ：受電有効電力， P_L ：負荷有効電力

Q_R ：受電無効電力， Q_L ：負荷無効電力

Q_{SC} ：SC 無効電力

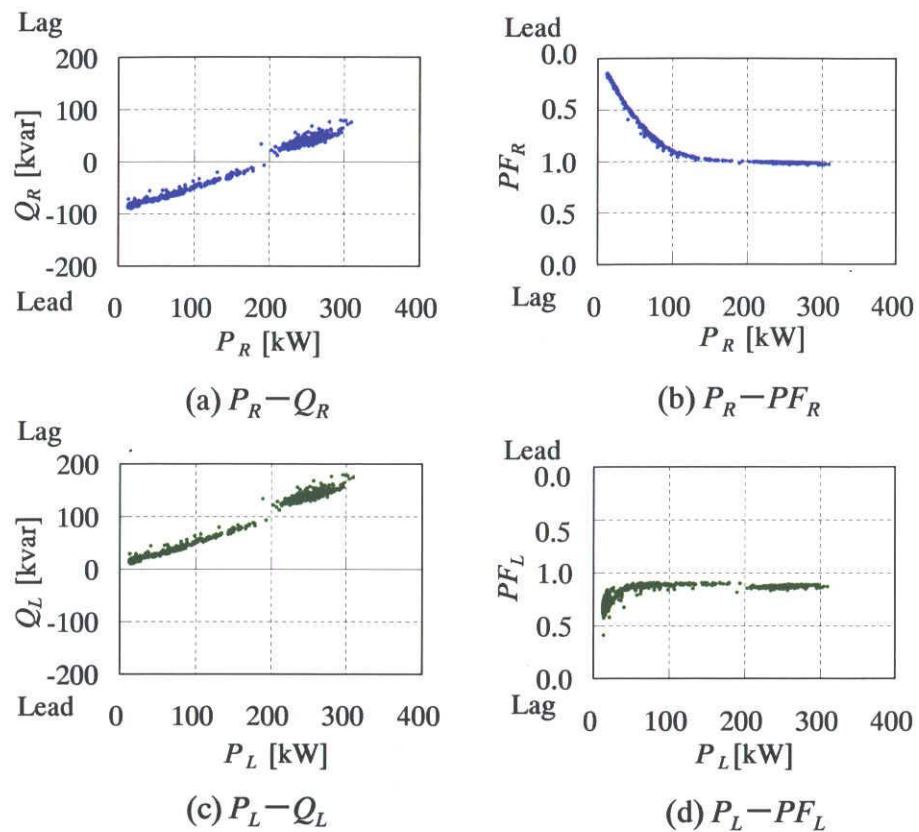


図 3.1 自動力率調整がない需要家の電力と力率の関係例

Fig.3.1 Relations between active power, reactive power and power factor of HV consumer without APFC

図 3.1 に APFC が設置されていない需要家（事務所，変圧器合計容量 550kVA）における，5 分毎に実測した有効電力と無効電力，及び有効電力と力率の散布図の一例を示す。なお無効電力の符号は，マイナス側が進みを表している。図 3.1(a)より， P_R と Q_R の関係は直線的であることが分かる。図 3.1(b)より， P_R が 200kW 以上の場合， PF_R はおおむね 1 であるが， P_R が小さくなるほど PF_R は進みとなっている。図 3.1(c)より P_L と Q_L の関係は原点付近を通る直線的である。また図 3.1(d)では， P_L が 50kW 以上の場合， PF_L はおおむね 0.9 で一定であるが， P_L が 50kW 以下の場合， PF_L は 0.6 程度まで遅れになっていることが分かる。これは，負荷に変圧器を含んでいるため，有効電力が小さくなると変圧器の無負荷電流による遅れ無効電力が相対的に大きくなるためであると考えられる。

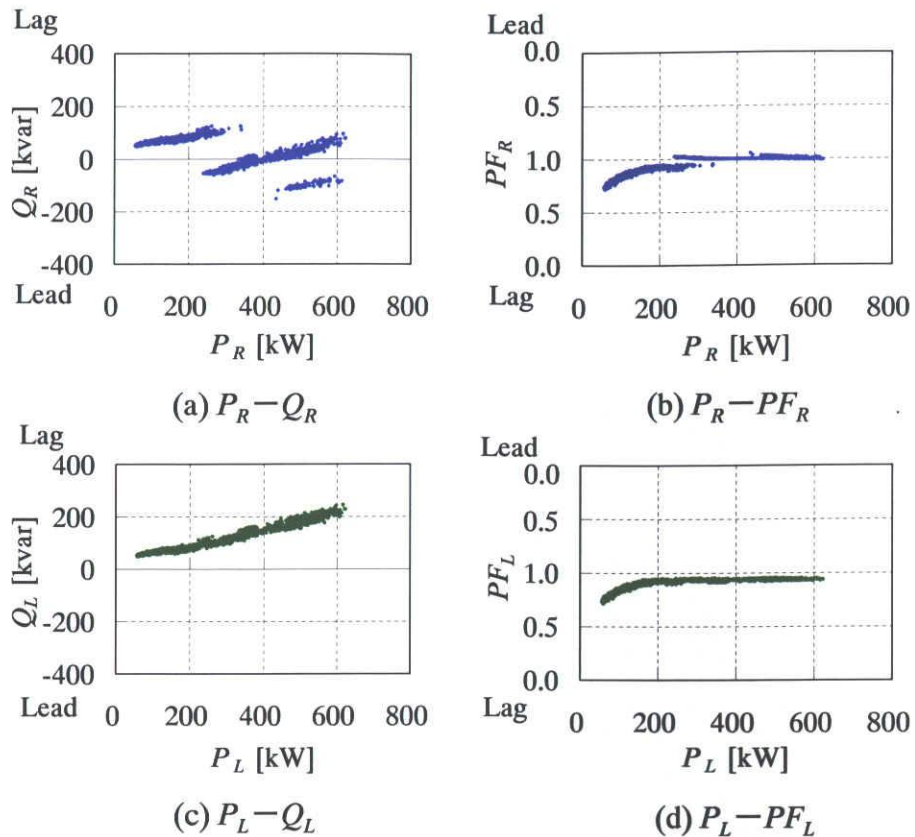


図 3.2 自動力率調整がある需要家の電力と力率の関係例

Fig.3.2 Relations between active power, reactive power and power factor of HV consumer with APFC

図 3.2 に APFC が設置されている需要家（事務所，変圧器合計容量 2550kVA）における有効電力と無効電力，及び有効電力と力率の散布図の一例を示す。図 3.2 から分かるように，APFC が設置されている需要家では，SC の開閉により Q_R は段階的に変化し， P_R と Q_R のプロットは複数に分かれるが⁽³⁾， P_L と Q_L のプロットは 1 つにまとまり，両者は直線的な関係となる。

第 2 章で実測した 30 軒の需要家において，夏季及び中間季の各実測データに対して， P_L と Q_L の相関係数を算出した結果，全 60 データの 80% 以上にあたる 49 データにおいて相関係数は 0.8 以上であった。この結果から，大部分の高圧需要家では，負荷全体の有効電力と無効電力の関係は直線的であることが分かった。これは高圧需要家の負荷力率が有効電力に関係なくおおむね一定であることを意味している。

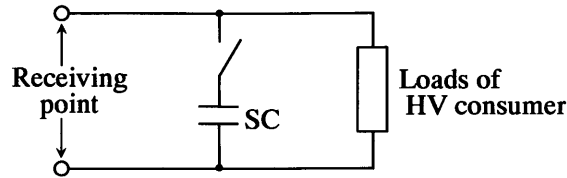


図 3.3 高圧需要家モデル

Fig.3.3 The proposed model of HV consumer

3.3.2 高圧需要家モデル

前項の結果を受け、図 3.3 に示すような高圧需要家を有効電力と無効電力の関係が直線で表される 1 つの負荷と力率改善用 SC で表現したモデルを検討する。そして負荷の時間断面毎の有効電力（ロードカーブ）と力率を実測データに基づき次のとおり設定することで、高圧需要家の力率の実態を反映できる評価モデルとする。

まず、負荷のロードカーブについては、5～10 分間隔の有効電力の実測値を 1 時間毎に平均し、それらを業種毎に分類して夏季と中間季別及び平日と休日別に同一時刻の平均値を求め、当該業種のロードカーブとする。このようにして実際に求めたロードカーブのうち代表的な 4 業種の夏季平日ロードカーブを図 3.4 に示す。図 3.4 の縦軸は、夏季の最大値で正規化してある。これに高圧需要家の契約電力を乗じることでロードカーブを設定する。

次に負荷の力率は、実測データから得られた有効電力と無効電力の関係から設定する。具体的には、業種毎に 1 時間毎の有効電力と無効電力の平均値を求め、その散布図をプロットする。それから直線近似式を求めることで、業種毎の負荷の有効電力－無効電力特性を設定する。このようにして実際に求めた業種毎の有効電力－無効電力特性を図 3.5 に示す。図 3.5 の縦軸及び横軸は有効電力の夏季最大値で正規化してある。これにロードカーブと同様に需要家の契約電力を乗じて無効電力を設定した上で、(3.4)式により負荷力率を算出する。なお図 3.5 を見ると、製造業は他の業種よりも近似直線の傾きが大きくなっている。これは、製造業は他の業種よりも平均的に力率が遅れていることを示している。また、3.3.1 項でも述べたように変圧器の遅れ無効電力の影響で近似直線の切片は正の値となる。このため負荷力率は有効電力が小さくなるほど遅れとなる。また SC については、1 バンクあたりの容量、バンク数及び容量制御方法を設定する。なお、具体的な容量制御方法は 3.4.1 項で述べる。

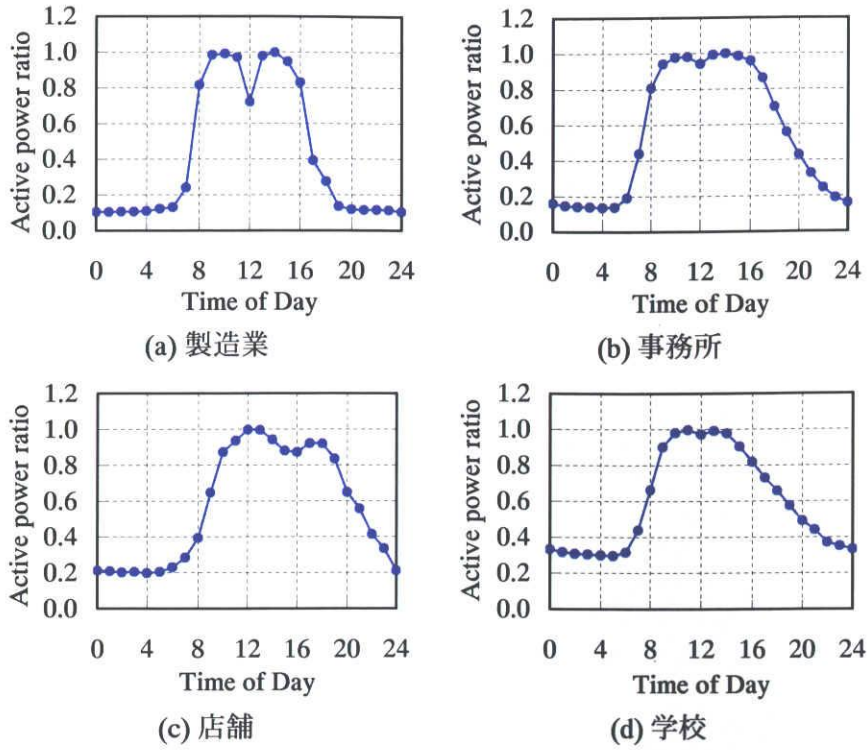


図 3.4 業種毎の夏季平日平均ロードカーブ

Fig.3.4 Average weekday trend of active power in HV consumers in summer

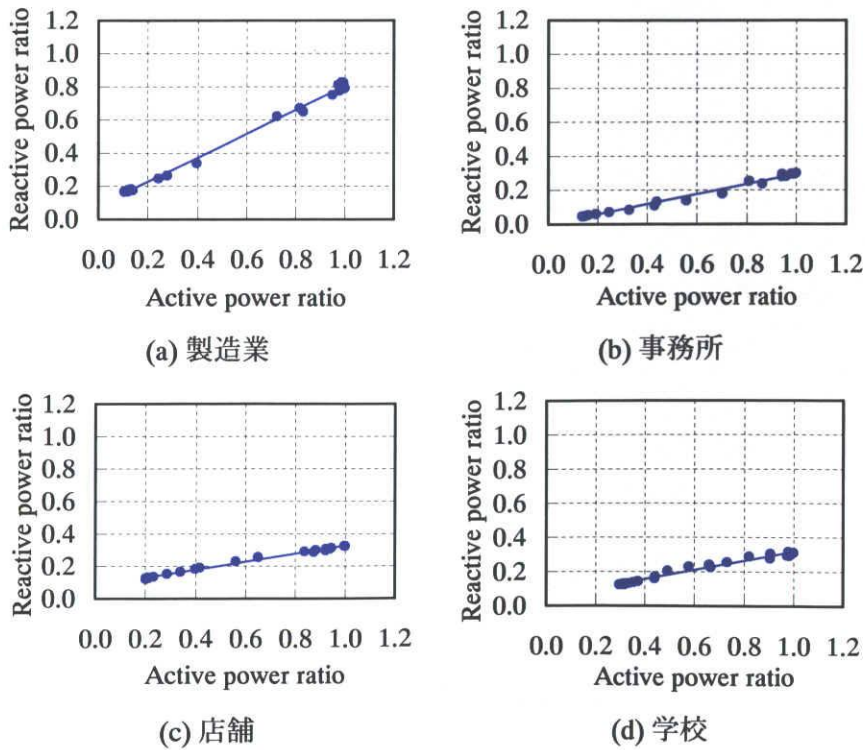


図 3.5 業種別の負荷の有効電力-無効電力特性

Fig.3.5 Average characteristics of active power and reactive power of loads in HV consumers

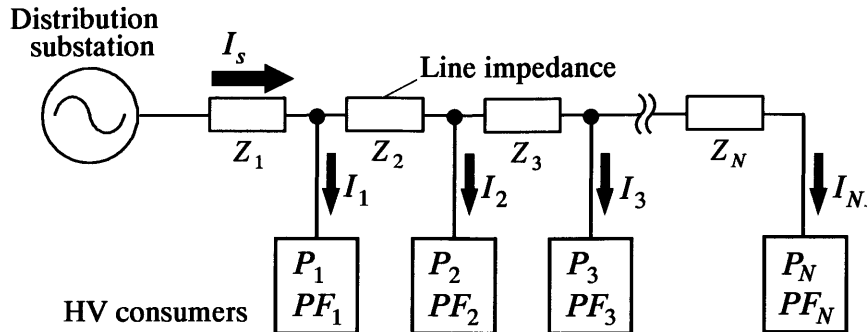


図 3.6 配電システムモデル

Fig. 3.6 The Model of distribution line with HV consumers

3.3.3 配電システムモデル

図 3.3 の高圧需要家モデルを組み合わせ、図 3.6 に示すような配電システム全体の評価モデルを構築し、配電システム各所の電流を計算する。具体的な手順は次のとおりである。

- (1) 各高圧需要家モデルの電力と力率を、図 3.4 や図 3.5 のように業種毎にあらかじめ作成したデータベースと需要家の契約電力をもとに設定する。
- (2) 各高圧需要家を電流源とし、受電電圧を 6.6kV とした場合の電流を求める。
- (3) 各高圧需要家電流を送り出し点の方向に積み上げていき、配電システム各所の電流を求める。
- (4) 積み上げにより求められた送り出し電流が、当該配電システムの送り出し電流の管理値と合うように、各需要家の契約電力に一律の補正係数を乗じて、電流を再度計算する。

この手法では、高圧需要家の電力や力率をより実態に合った値に設定でき、配電システムの計画や運用の実務においても進み力率によるフェランチ効果を考慮することが可能となるメリットがある。

3.4 自動力率調整装置導入効果の定量評価

3.4.1 評価方法

平均的な配電システムを想定し、3.3 節において提案した評価モデルを用いて、APFC の導入効果の定量評価を行った。図 3.7 に想定した配電システムモデルを示す。線路の総こう長は 10km とし、高圧需要家軒数は中部電力管内の高圧需要家数や変電所数等から平均的な値を推定し 13 軒とした。業種毎の数は、中部電力管内における高圧需要家全体の業種の比率を参考に決定した⁽⁴⁾。各高圧需要家の夏季平日の最大電力は、第 2 章の実測データの平均値である

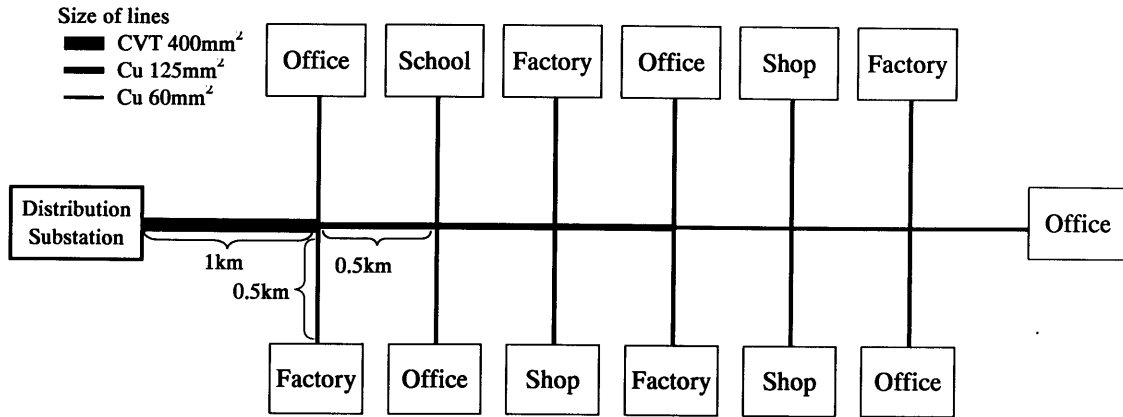


図 3.7 評価対象とした配電システムモデル

Fig. 3.7 The evaluated model of conventional distribution line with typical HV consumers

表 3.1 SC の制御方法

Table 3.1 SC control schemes

運用条件	SC 制御方法
自動力率調整	需要家の受電力率が 1 より進みとなる最小の SC バンク数を投入する
タイマー制御	SC の全容量をタイマー等により 8 時から 22 時まで投入し、それ以外の時間帯は開放する
常時開放	SC の全容量を常時開放する

218kW とした。また、各高圧需要家のロードカーブと力率は、業種に応じて図 3.4 及び図 3.5 を用いて設定した。

SC に関する条件は、これまでの調査結果⁽⁴⁾を参考に、高圧需要家の SC 容量は 1 バンクあたり 50kvar とし、バンク数は SC の総容量が契約電力の 3 分の 2 倍となるように設定した。また、SC はすべての高圧需要家で全容量が常時投入されているものとした。以上のように設定した条件を「現状」とした。これに対し、配電システムのすべての高圧需要家が表 3.1 の SC 制御手法を採用した場合を想定し、表 3.2 に示す項目を評価した。

表 3.2 評価項目

Table 3.2 Evaluated categories by simulation

項目	具体的内容
電圧上昇	評価対象箇所の電圧実効値 －送り出し電圧実効値
電圧変動幅	評価対象箇所の電圧実効値の 最大値と最小値の差の絶対値
配電損失	送り出し点から評価対象箇所までの電力損失
CO ₂ 排出量	配電損失を CO ₂ 排出量に換算した値 (CO ₂ 原単位：0.555[kg-CO ₂ /kWh] ⁽⁵⁾)

3.4.2 評価結果

図 3.8 に末端電圧の夏季平日 1 日の変化を示す。現状 (Actual condition) では、電圧上昇の値は、昼間は 0V 程度であるのに対して、夜間の軽負荷時には 200V 以上にまで大きくなっている。この夜間の電圧上昇は、系統全体が進み力率であることに起因したフェランチ効果によるものである。一方、APFC を導入した場合は、現状と比較して電圧上昇が抑制されており、最大値は夜間においても 50V 未満である。タイマー制御 (Time scheduling) の場合は、8 時から 22 時の時間帯は現状と同じであり、それ以外の時間帯は常時開放 (Always opening) と同じである。そのため 8 時及び 22 時に SC の開放や投入が一斉に行われることで、電圧変動が大きくなってしまふ。これに対し常時開放の場合は、系統全体の力率が遅れとなるため終日電圧降下が発生し、昼間の電圧降下は 250V 程度と大きくなってしまふ。

なお、APFC を導入した場合にも電圧上昇が発生しているのは、需要家の受電力率が常に 1 よりも進みとなる最小の SC 容量を 50kvar 単位で調整しており、軽負荷時には各需要家は進み力率となっているためである。よって、SC の 1 バンクあたり容量を、需要家の電力使用状況に合わせてできる限り小さくすれば、電圧上昇抑制効果はさらに大きくなると考えられる。

タイマー制御は 8 時と 22 時に一斉に SC が開閉されると想定した。これは電力料金の力率割引を考慮したものであるが、各需要家間で負荷稼働状況や SC 開閉状況の情報をやり取りしながら SC 開閉時刻を調整して、配電系統の電圧変動を抑制することも可能であると考えられる。

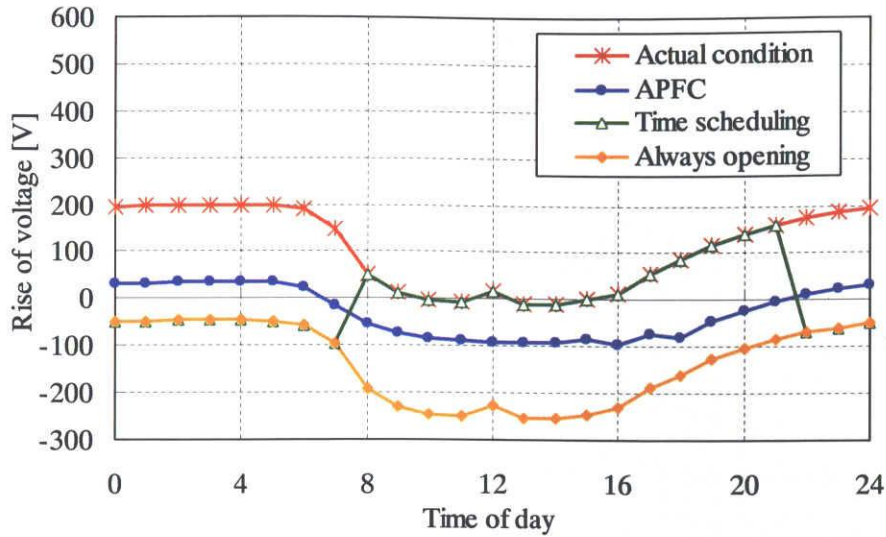


図 3.8 対象系統末端電圧の計算結果

Fig. 3.8 Trend of voltage at the end of distribution line

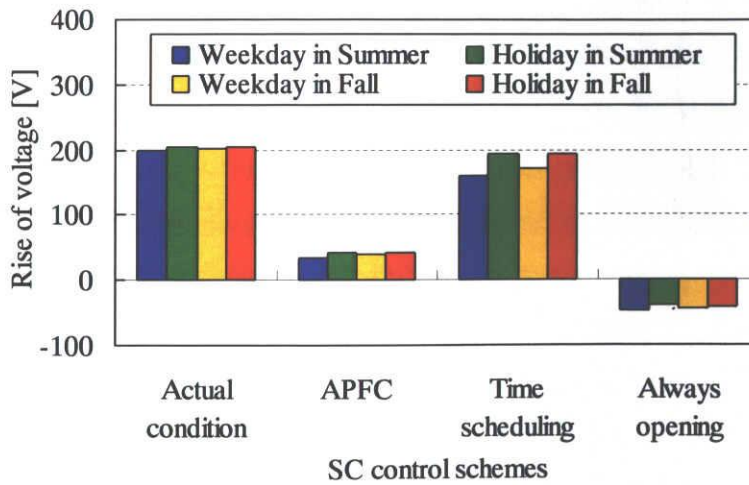


図 3.9 電圧上昇の比較

Fig. 3.9 Rise of voltage with each SC control schemes

図 3.9 に電圧上昇を SC の制御手法別に比較した結果を示す。結果は、夏季平日、夏季休日、中間季平日、中間季休日の 4 通りの負荷状況について示した。いずれの負荷状況においても、現状は 200V 程度であるが、APFC の場合 50V 以下に抑制されることが分かる。

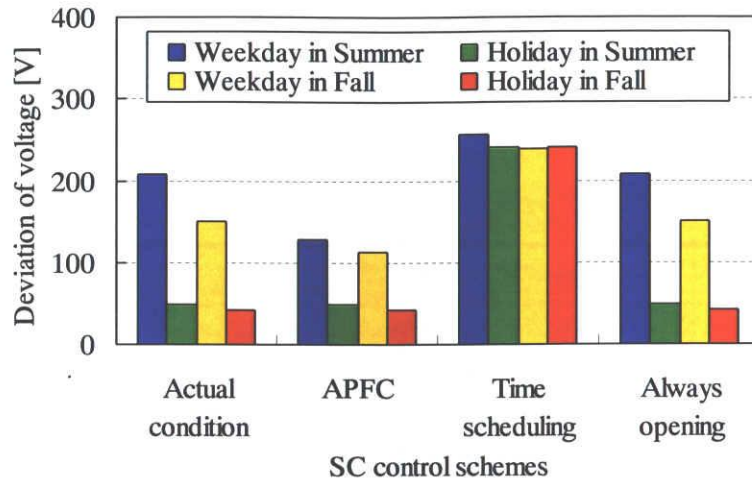


図 3.10 電圧変動の比較

Fig. 3.10 Deviation of voltage with each SC control schemes

図 3.10 には電圧変動を示す。APFC を導入したとき、夏季平日では 210V が 130V になり約 60%に抑制でき、中間季平日では 150V が 110V になり約 80%に抑制できる。このように、APFC の導入により電圧変動は現状の 60~80%に抑制されることが分かる。

図 3.11 に配電損失を示す。いずれの負荷状況においても現状は 1 日あたり 550~700kWh 程度であるのに対して、APFC では最も損失が大きい夏季平日では 750kWh から 350kWh になり 50%程度に削減され、軽負荷となる休日では 550kWh から 100kWh になり 20%以下に削減されることが分かる。また常時開放の場合でも、配電損失が APFC と同程度に削減されることも分かる。これは前述のとおり、APFC 導入時においても高圧需要家の受電率が進みとなっているためである。

夏季を 6~9 月の 4 ヶ月間、中間季を残りの 8 ヶ月とし、APFC 導入時に削減できる配電損失の年間合計値を算出すると 145MWh/年となった。これは対象系統の供給電力量の 2.0%に相当する。またこれを表 3.2 の CO₂ 原単位を使用して CO₂ 排出量に換算すると、80.7t/年となる。よって、配電系統構成や接続される高圧需要家の種類や規模により導入効果に差はあろうが、省エネルギーや CO₂ 削減の観点からも、APFC の導入促進を今後具体的に検討していく価値は十分にあるものと考ええる。

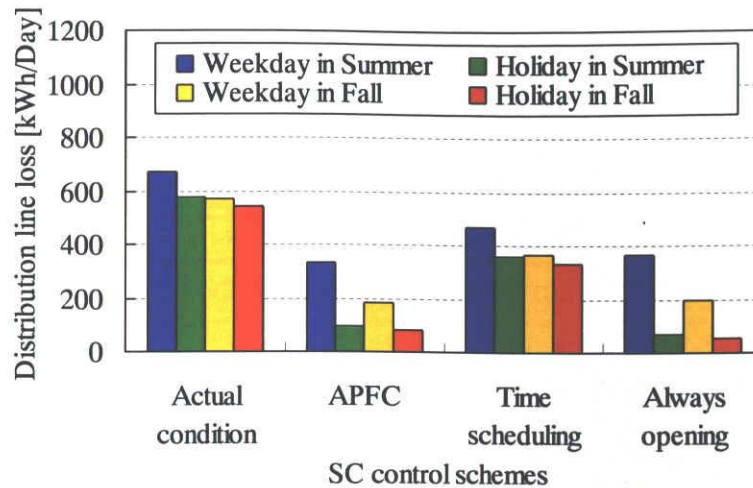


図 3.11 配電損失の比較

Fig. 3.11 Distribution line loss with each SC control schemes

3.5 結言

本章では、高圧需要家における自動力率調整装置の導入による配電システムの電圧上昇や配電損失の抑制効果を定量的に評価した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 実測結果から、大部分の高圧需要家の負荷全体の有効電力と無効電力の関係は直線的であった。そしてその結果から、高圧需要家を1つの負荷とSCで表現し、実態に合った力率を設定できる評価モデルを提案した。
- (2) 平均的な配電システムにおいて、すべての高圧需要家にAPFCを導入した場合には、電圧上昇が200V程度から50V程度に抑制できる。
- (3) APFCの導入による配電損失の削減分は、145MWh/年となり、これは供給電力量の2.0%に相当する。

本章では、高圧需要家へのAPFCの導入による配電システムへの効果に着目して定量評価を行った。APFC導入促進のためには、低圧SCの設置も含めた高圧需要家に与えるメリットを定量的に評価することも必要であり、今後の課題である。

第3章 参考文献

- (1) 原 英喜：「高圧受電設備における進相コンデンサ容量と自動力率調整装置導入の実態」，電気設備学会誌，Vol.26，No.6，pp.409-412 (2006)
- (2) 和田 勝，松田勝弘，渡辺雅浩，山崎 信：「高圧配電システムの力率測定事例について」，平成18年度電気関係学会東北支部連合大会，1H9 (2006)
- (3) 愛澤忠良：「高圧受電特性からの需要家進相設備諸元の推定－投射力率角収束法によるコンデンサ容量の推定－」，電学論 B，Vol.124，No.12，pp.1497-1503 (2004)
- (4) 高圧受電設備の使用実態と進相コンデンサ容量の最適化に関する調査研究委員会：「高圧受電設備の使用実態と進相コンデンサ容量の最適化に関する調査研究報告書」，(社)電気設備学会中部支部，(2006)
- (5) 地球温暖化対策の推進に関する法律施行令第3条(2006)

第 4 章

高圧需要家への自動力率調整装置導入による 高調波電圧抑制

4.1 緒言

配電システムにおける電力品質の中で、高調波は進相コンデンサ（以下、SC とする）用直列リアクトルの焼損などの障害を引き起こす可能性があり、従来から重要な課題となっている。特に、近年高圧需要家ではインバータに代表されるパワーエレクトロニクス機器の普及が進んでおり、これらの機器の多くが高調波電流を配電系統に流出するため、配電系統に高調波電圧が発生する。高調波電圧が過大になると電気設備機器が高調波障害を受けることから、その防止のためには配電系統や高圧需要家における高調波電圧や電流を適正な値に維持する必要がある。そのための高圧需要家側での対策として、高調波流出電流を契約電力により定まる上限値以下に抑えることが「高圧又は特別高圧で受電する需要家の高調波抑制対策ガイドライン」（以下、ガイドラインとする）により求められている。しかしながら、ガイドラインでは計算による評価のみを求めていることから、高圧需要家の高調波流出電流が上限値以下に抑制されているかの実態は、実測により把握する必要があるが⁽¹⁾、これまでほとんど明らかとなっていない。

一方、第 3 章では高圧需要家の SC への自動力率調整装置（以下、APFC とする）の導入により配電系統の電圧上昇および配電損失を抑制できることを定量的に示した。APFC を導入する際には、SC 投入時の突入電流抑制のために直列リアクトルを設置する必要がある⁽²⁾。この直列リアクトルのインピーダンスは、SC インピーダンスの 6% とするのが標準的であり⁽³⁾、配電系統に最も多く含まれる高調波成分である第 5 調波に対して低インピーダンスとなる。よって APFC の導入は結果的に配電系統の高調波抑制に寄与すると考えられる。今後 APFC の導入促進のためには、高調波抑制効果を定量的に評価することは重要であり、そのためには高圧需要家から流出する高調波電流の実態を反映した評価モデルを構築する

表 4.1 高圧需要家の高調波流出電流上限値

Table 4.1 Regulated harmonic current by the guideline

高調波次数	5	7	11	13	17	19	23	23 超過
上限値 [mA/kW]	3.5	2.5	1.6	1.3	1.0	0.90	0.76	0.70

ことが必要である。配電系統の高調波を評価するためのモデルに関する研究は、これまでにいくつか行われているが⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾、配電系統に接続される需要家全体一括してモデル化するものがほとんどであり、個別の高圧需要家の高調波発生パターンまでは考慮されていない。

これらの背景を踏まえ、本章ではまず実測調査により高圧需要家から配電系統に流出する高調波電流の実態を実測調査により把握した。次にこの実測結果を用い、APFC 導入による配電系統の高調波抑制効果を定量評価することを目的とした、高調波発生源を有する高圧需要家の簡易モデルを提案した。そして提案モデルを用いたシミュレーションにより、高圧需要家の SC への APFC または直列リアクトルの導入による配電系統の高調波電圧抑制効果を定量的に評価した。

4.2 高調波抑制対策ガイドランの概要

ガイドラインに示された高調波電流抑制の考え方を概説する。ガイドラインでは、高圧需要家から系統に流出する高調波流出電流を定められた方法により計算し、その計算値を契約電力 1kW あたりで規定された上限値以下に抑制することが求められている⁽⁷⁾。表 4.1 に高圧需要家の高調波流出電流上限値を示す。表 4.1 から分かるように、高調波流出電流上限値は次数毎に電流実効値のみで定義されている。

高調波流出電流 I_{nmax} は次式で計算される。

$$I_{nmax} = \sum^L (aP_i \times k \times h_n) \quad (4.1)$$

ここで、

a : 機器容量の受電電圧換算定格電流値への換算係数

(6.6kV 受電の場合, 87.48mA/kW)

k : 機器最大稼働率 (高調波発生機器の総容量に対する実稼働している機器が最大となる容量と (30 分間の平均値) の比。)

h_n : 個別機器の高調波電流含有率

L : 高調波発生機器の台数

表 4.2 ビル設備用インバータ等の稼働率（標準値）

Table 4.2 Standard value of maximum operating ratio of facilities in buildings

設備種類	機器容量区分	インバータ運転等 単体機器稼働率 k
空調機器	200kW以下	0.55
	200kW超過	0.6
衛生ポンプ	—	0.3
エレベータ	—	0.25
冷凍冷蔵機器	50kW以下	0.6
UPS(6パルス)	200kVA以下	0.6

機器最大稼働率は 30 分間の平均値を用いて定義されており，高圧需要家の建物使用状況等を考慮した実情に合った値に設定することが望ましいが，設備設計の実務では表 4.2 に示した設備種類毎の標準値が用いられることが多い⁸⁾。さらに高調波流出電流の評価は，手続き上は計算過程や計算結果を記載した計算書を電力会社に提出すればよいため，必ずしも実測により評価する必要はない。これらの理由から，高圧需要家の高調波流出電流が上限値以下に抑制されているかの実態は，これまでほとんど明らかとなっていない。

4.3 高圧需要家における高調波の実測

4.3.1 実測方法

高圧需要家における高調波流出電流の実態を把握するため，表 4.3 に示すような 8 軒の高圧需要家の受電点にて実測を行った。対象需要家の設備容量は 250～4325kVA（平均容量 924kVA）である。また，測定方法は表 4.4 に示すとおりである。季節による差を確認するため，夏季及び中間季の 2 回にわたって連続測定を実施した。

4.3.2 高調波電流の分析方法

高圧需要家の受電点にて実測される高調波電流には，配電系統から高圧需要家に流入する成分と高圧需要家から配電系統に流出する成分の両方が含まれている。そのためこれらの成分を分離して評価する必要がある。そこで，文献 9 において提案されている配電用変電所における高調波電流の方向別分離手法を高圧需要家の受電点に応用した手法により両成分の分離を行った。

表 4.3 実測対象需要家の概要

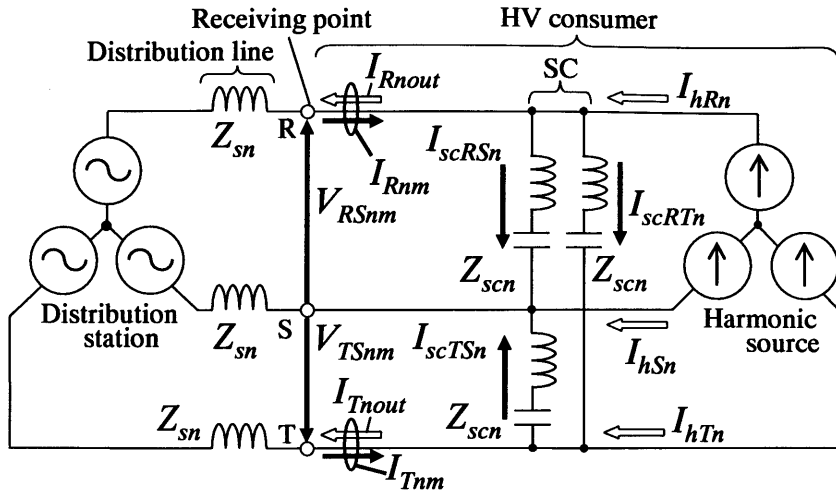
Table 4.3 Outline of measured high voltage consumers

名 称	建物用途	契約電力 [kW]	三相変圧器 容量[kVA]	単相変圧器 容量[kVA]	SC 合計 容量[kvar]	SC 用直列 リアクトル
需要家 A	工場	110	300	100	100	なし
需要家 B	公共施設	318	630	450	275	6%
需要家 C	工場	167	400	30	150	なし
需要家 D	研究施設	325	150	175	50	なし
需要家 E	事務所	347	450	200	174	6%
需要家 F	事務所	152	325	150	100	なし
需要家 G	事務所	131	150	100	75	なし
需要家 H	工場	1267	3800	525	740	6%

表 4.4 高圧需要家の実測方法の概要

Table 4.4 Conditions of measurement at HV consumers

項 目	内 容
測定箇所	受電点
測定項目	各相の電圧, 電流の実効値, 位相角
測定次数	基本波, 第 5 調波, 第 7 調波
測定時期	夏季(7~9 月), 中間季(10~12 月)
測定期間	連続 1~2 週間
測定間隔	5 分毎に瞬時値を測定



- V_{RSnm}, V_{TSnm} : 実測される第 n 調波電圧 (RS 間, TS 間)
- I_{Rnm}, I_{Tnm} : 実測される第 n 調波電流 (R 相, T 相)
- I_{Rnout}, I_{Tnout} : 需要家から流出する第 n 調波電流 (R 相, T 相)
- Z_{scn} : SC および直列リアクトルの合計第 n 調波インピーダンス
- Z_{sn} : 配電線の第 n 調波インピーダンス
- $I_{hRn}, I_{hSn}, I_{hTn}$: 高調波発生源の第 n 調波電流 (R 相, S 相, T 相)
- $I_{scRSn}, I_{scTSn}, I_{scRTn}$: SC の第 n 調波電流 (RS 間, TS 間, RT 間)

図 4.1 高調波電流の方向別分離のための配電系統と高圧需要家の等価回路

Fig.4.1 Equivalent circuit of measured HV consumers in order to separate harmonic current

図 4.1 に高調波電流の方向別分離のための配電系統と高圧需要家の等価回路を示す。図 4.1 は、配電系統側の高調波発生源を高調波電圧源とおき、高圧需要家側の高調波発生源を高調波電流源とおいたものである。すなわち、配電系統から高圧需要家に流入する成分は高調波電圧源にのみ起因するとし、逆に流出する成分は高調波電流源にのみ起因するとする考え方である。また、高圧需要家側は SC と高調波電流源のみで構成されている。図 4.1 において、 $V_{RSnm}, V_{TSnm}, I_{Rnm}, I_{Tnm}$ は受電点にて実測可能な値である。SC 回路のインピーダンスは、現地調査や SC 電流の実測により SC 容量を確認して決定する。配電線インピーダンスは受電点の短絡電流から決定する。これらのインピーダンス値を用いて図 4.1 の回路を解くことによって、 I_{Rnm}, I_{Tnm} から I_{Rnout}, I_{Tnout} を分離して評価する。

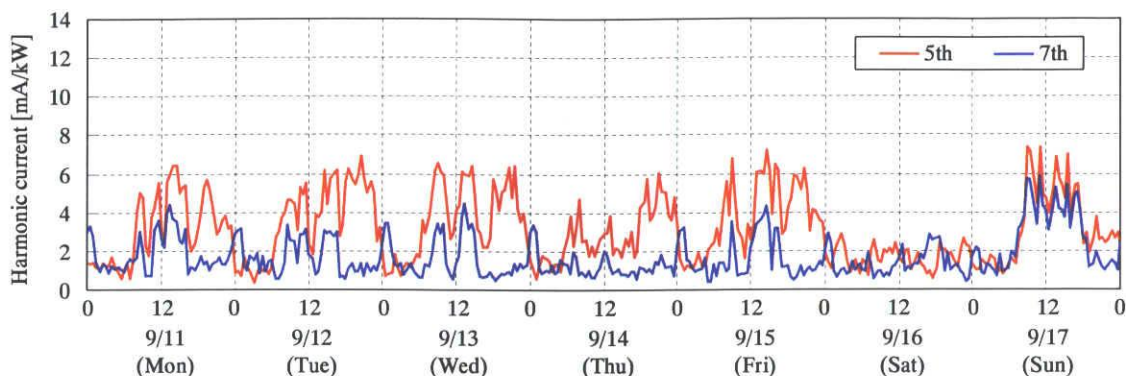


図 4.2 需要家 A の受電点における高調波電流実測値の時間変化

Fig.4.2 Example trend of measured harmonic current on receiving point in HV consumer

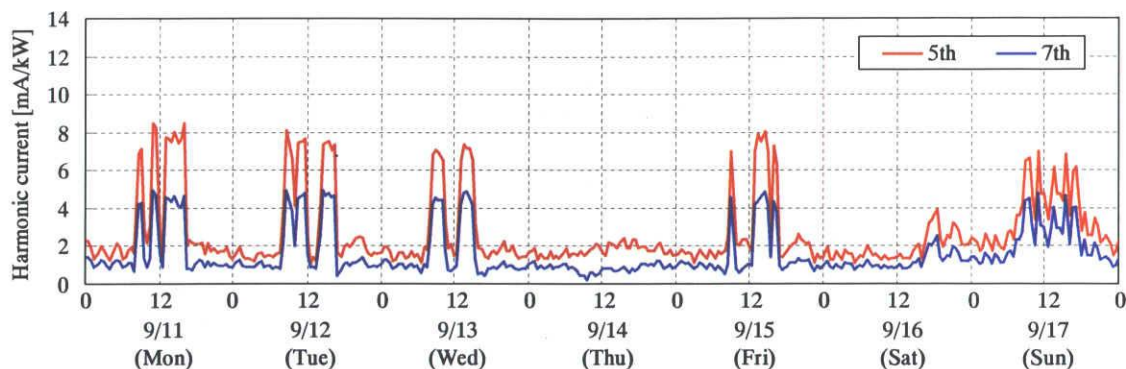


図 4.3 実測値から分離された高調波流出電流の時間変化

Fig.4.3 Example trend of harmonic current flowing out from HV consumer

4.3.3 実測結果

実測結果の一例として、図 4.2 に需要家 A において実測された第 5 調波および第 7 調波電流の 1 週間の時間変化を示す。図 4.2 では 5 分間隔で得られた実測データをもとに、ガイドラインの機器最大稼働率の定義と同様の考え方で 30 分毎の平均値を求めて示した。また図 4.2 の縦軸は、ガイドラインの上限値との比較を容易にするために、高調波電流を契約電力（ここでは当該需要家の夏季実測期間における最大需要電力値である 110kW を使用）で除した値で示した。

図 4.2 から分かるように、第 5 調波電流は 1~7mA/kW の間で変動している。需要家 A は工場であり、18 時以降は操業が停止するため負荷機器はほとんど使用されない。しかしながら、第 5 調波電流は 18 時以降もそれ以前の時間帯と同程度である。このことから実測された第 5 調波電流には、需要家 A の負荷機器とは無関係な成分が含まれていると考えられる。

一方、図 4.3 に分離手法により実測値から分離された高調波流出電流の時間変化を示す。図 4.3 より、第 5 調波電流は 8 時から 18 時あたりの工場操業時間帯では 2~8mA/kW の間で急激に変化するが、18 時から翌朝 8 時あたりの時間帯では 2mA/kW 程度で一定である。需要家 A の現地調査結果から、図 4.3 の第 5 調波電流が大きくなる時間帯には、工場内に設置された送風用インバータが稼働したことが分かっており、これより図 4.3 の高調波流出電流値は実測値から流出分のみを分離できているといえる。第 7 調波も第 5 調波と同様な時間変化を示していることから、需要家 A では送風用インバータから第 5 調波と第 7 調波電流を多く流出していると判断される。

図 4.3 のインバータが稼働している時間帯の高調波流出電流を図 4.2 と実測値と比較すると、実測値は流出電流より小さくなる傾向があることが分かる。これは流出分と流入分が打ち消し合った高調波電流が実測されているためである。

4.3.4 ガイドラインとの比較

図 4.3 の高調波流出電流をガイドラインの上限値と比較すると、第 5 調波電流は昼間の時間帯において上限値の 3.5mA/kW を超過していることが分かる。また、第 7 調波電流においても同様に上限値の 2.5mA/kW を超過している。したがって、ガイドラインの考え方によれば、需要家 A は高調波フィルタ等の対策設備の導入により、高調波流出電流をさらに抑制する必要がある。

図 4.4 と図 4.5 に、実測した 8 軒の高圧需要家における高調波流出電流の最大値を季節別に示す。図 4.4 には第 5 調波、図 4.5 には第 7 調波をそれぞれの上限值とともに示した。例えば需要家 A の高調波流出電流最大値は、夏季と中間季の両方で上限値を上回っている。このように 8 軒全体を見ると、図 4.4 の第 5 調波では 8 軒中 6 軒、図 4.5 の第 7 調波では 8 軒中 5 軒の需要家が、いずれかの季節において上限値を上回っていることが分かる。この結果から、多くの高圧需要家の高調波流出電流は上限値を上回っている可能性があることが推測される。したがって、配電系統の高調波電圧を適正に維持するには、高圧需要家の高調波流出電流をさらに抑制していく必要がある。

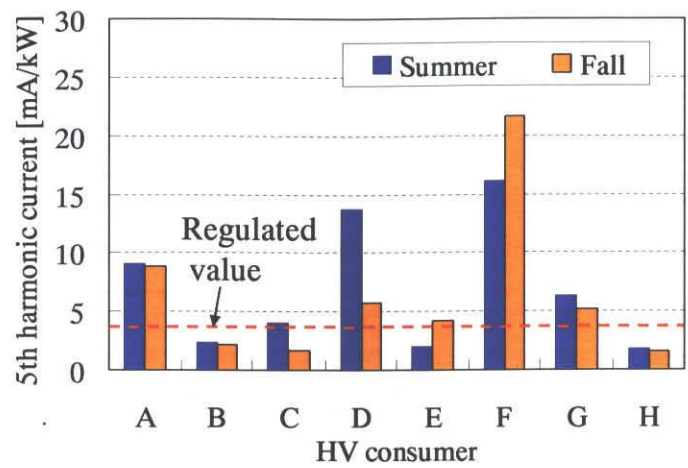


図 4.4 実測した 8 軒の需要家の第 5 調波流出電流最大値
 Fig.4.4 Maximum of 5th harmonic current of all eight consumers

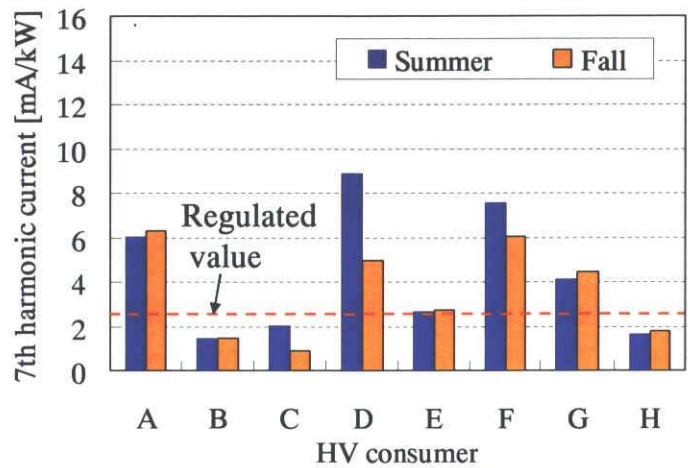


図 4.5 実測した 8 軒の需要家の第 7 調波流出電流最大値
 Fig.4.5 Maximum of 7th harmonic current of all eight consumers

4.3.5 自動力率調整装置導入の必要性

高圧需要家からの高調波流出電流を抑制するには、次の2つの方法が考えられる。

- (1)インバータ等の負荷機器から流出する高調波流出電流を抑制する。
- (2)受電点から配電系統に流出する高調波電流を受変電設備等において抑制する。

本章では(2)の方法に着目する。高調波電流を効果的に抑制するにはアクティブフィルタやパッシブフィルタ（受動フィルタ）等の高調波対策機器の導入が望ましい。しかしながら、これらの機器は高価であることから、特に契約電力が500kW未満程度の比較的小規模な高圧需要家では現状の普及率は極めて低い⁽¹⁰⁾。

これに対して、SCは受電点の力率改善を目的に大部分の高圧需要家に設置されている。ただし現状では、SCに直列リアクトルが設置されていない需要家が多いが⁽¹⁰⁾、直列リアクトルがない場合には負荷機器から発生した高調波電流を受電点で拡大させてしまう。これに対しSCインピーダンスの6%の直列リアクトルを設置すればSC回路に第5調波電流を吸収する役割を持たせることができる。APFCの導入が進めばSC開閉時の突入電流の抑制のために直列リアクトルが設置されることで直列リアクトル設置率も高くなり、配電系統全体の第5調波電圧の低減に寄与すると考えられる。

4.4 シミュレーションモデル

本節では、配電系統の高調波を定量評価することを目的とし、高圧需要家からの高調波流出電流の実態を反映した簡易な高圧需要家モデルを提案する。

図4.6に基本となる高圧需要家モデルを示す。これは、第3章にて提案した電圧上昇および電力損失評価のための高圧需要家モデルを、高調波評価用に拡張したものである。高調波発生源は電流源で模擬し、さらに負荷機器全体とSCを線形インピーダンスで並列に接続している。第3章では、負荷の時間断面毎の有効電力（ロードカーブ）と力率を実測データに基づき設定し、需要家の力率の実態を反映できる評価モデルとした。本章ではさらに高調波電流源の特性を実測データに基づき設定することで、高調波の実態も反映できる評価モデルとした。

図4.6における高調波電流源の特性をモデル化するため、実測データを用い8軒の需要家毎の有効電力と負荷機器からの高調波流出電流の関係を分析した。ここで負荷機器からの高調波電流（以下、本節では高調波流出電流とする）とは、図4.1の等価回路における I_{hRn} 、 I_{hSn} 、 I_{hTn} を表している。図4.7に、横軸に有効電力、縦軸に高調波流出電流を取った散布

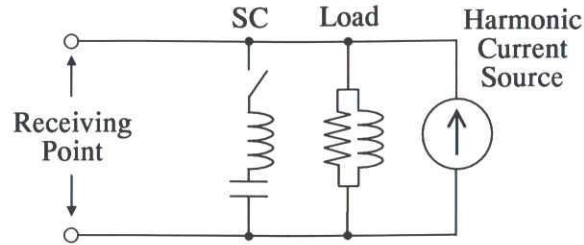


図 4.6 高調波電流源を有する高圧需要家モデル

Fig.4.6 Model of HV consumer with harmonic current source

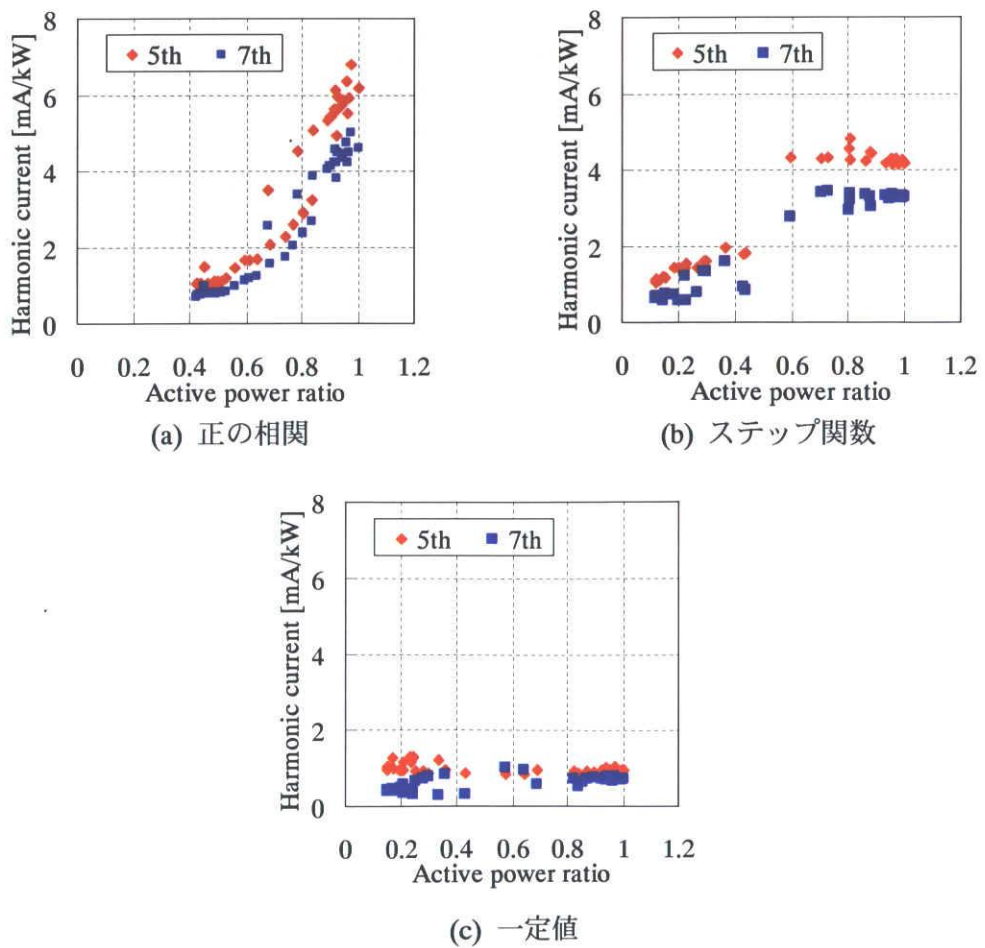


図 4.7 有効電力と高調波電流の相関関係

Fig.4.7 Relations between active power and harmonic current

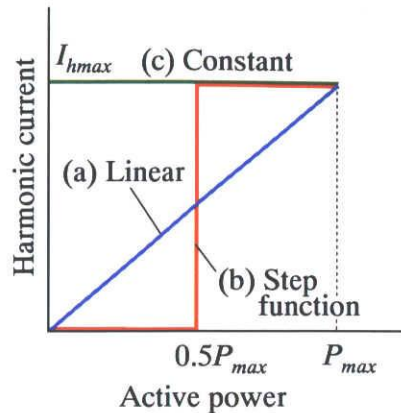


図 4.8 モデル化した有効電力と高調波電流の相関関係

Fig.4.8 Proposed model of relations between active power and harmonic current

図を示す。なお、横軸は夏季有効電力の最大値で正規化してある。各プロットは、5分間隔に算出された各相の高調波流出電流に対し、相毎に30分間隔で平均したものを実測期間中にわたり同一時刻で平均し、さらに各相の平均を取ったデータである。8軒の実測データを上記のように分析した結果、図4.7(a)(b)(c)に示した3種類の傾向に集約することができた。図4.7(a)は有効電力と高調波流出電流に正の相関が見られるパターンである。また図4.7(b)は有効電力に対して高調波流出電流がステップ状に変化するパターンである。また図4.7(c)は高調波流出電流が有効電力に無関係におおむね一定となるパターンである。本章の実測調査では、8軒の需要家内に設置されている負荷機器の詳細を調査することは困難であったが、正の相関となるのは比較的小容量の高調波発生機器（ビルマルチエアコン等）が複数台設置された需要家が考えられる。またステップ状となるのは、比較的電気容量が大きい熱源機器が設置された集中式空調システムの業務用ビルや、比較的電気容量が大きい生産機器が設置された工場等が考えられる。また一定となるのは、高調波発生機器が少ない需要家が考えられる。

図4.7に示した結果を踏まえて、本章では高圧需要家の高調波電流源の特性を図4.8に示すような3通りにモデル化した。図4.8中の(a)は図4.7(a)に対応した直線相関モデルであり、直線の傾きで高調波流出電流の大小を設定する。また図4.8中の(b)は図4.7(b)に対応したステップ関数モデルであり、ステップ変化をする有効電力と最大値で高調波流出電流を設定する。さらに図4.8中の(c)は図4.7(c)に対応した一定モデルである。実際にシミュレーションを行う際には、需要家の設備構成等を考慮して3通りの特性のうちいずれかを選択する。

また、図4.6における負荷インピーダンスは、高圧需要家の負荷全体の有効電力と無効電力を、回路電圧にてインピーダンス換算して求める。負荷全体の有効電力と無効電力は、

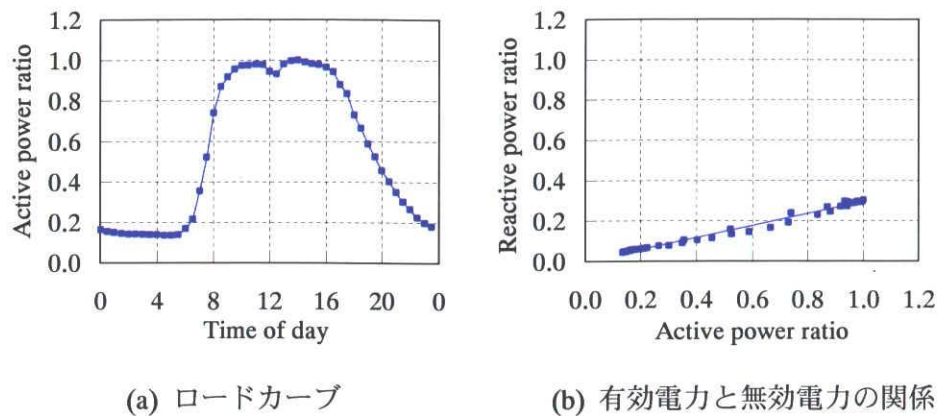


図 4.9 事務所ビルにおける有効電力と無効電力の特性

Fig.4.9 Characteristic of loads of office building

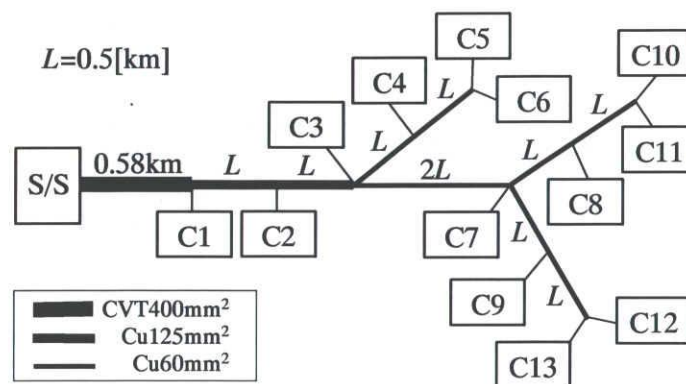


図 4.10 配電システムモデル

Fig.4.10 Model of distribution line

第 3 章にて提案した高圧需要家モデルと同様の方法で決定する。すなわち、当該需要家の業種と契約電力を設定し、あらかじめ業種毎に用意した平均的な有効電力の時間変化と有効電力と無効電力の関係をを用い、時間断面毎の有効電力と無効電力を設定する。図 4.9 に業種毎の有効電力と無効電力の一例として、事務所ビルの負荷全体の平均的な有効電力と無効電力を示す。

上記の方法で複数の高圧需要家モデルの条件を設定し、それらを評価対象とする配電システムの構成に応じて組み合わせることで配電システム全体の評価モデルを作成する。図 4.10 に本章で想定した配電システムモデルを示す。これは電気協同研究のシミュレーションで使用された配電システムモデルをもとに作成したものである⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。図 4.10 において C1, C2 等は図 4.6 に示した個別の高圧需要家モデルで与える。

4.5 自動力率調整装置の導入効果のシミュレーション

4.5.1 シミュレーション条件

4.4 節にて提案した高圧需要家モデルと配電システムモデルを使用し、高圧需要家への APFC 導入による配電システムの高調波電圧抑制効果をシミュレーションにより評価した。シミュレーション条件の詳細は次のとおりである。

- (1) シミュレーション対象の高調波次数は、一般的な配電システムにおいて最も多く含まれる次数である第 5 調波とした。
- (2) 各高圧需要家の業種は、事務所、工場、学校、店舗の 4 業種からランダムに設定した。
- (3) 各高圧需要家の契約電力は 150~450kW の範囲でランダムに設定した。
- (4) 各高圧需要家の合計 SC 容量は、最大需要電力時に受電力率が 1 より進みとなるように設定した。SC はすべて高圧母線に設置し、SC バンク数は 5 バンクとした。
- (5) 各高圧需要家の高調波電流源の特性は、図 4.8(a)(b)(c)の 3 通りから設定した。本節では、(a)の直線相関が最も多いものと考え、13 軒中 9 軒を(a)、2 軒を(b)、2 軒を(c)とし、配電システム上にランダムに配置した。
- (6) 各高圧需要家の第 5 調波流出電流の最大値は、3.0~5.0mA/kW の範囲でランダムに設定した。これは、4.3 節の実測結果において高調波流出電流がガイドラインの上限値である 3.5mA/kW を上回っている需要家が多かったことを考慮したものである。
- (7) APFC 導入時には、時間断面毎に受電力率が 1 より進みとなるように SC 容量を 1 バンク単位で増減させる台数制御を行うものとした。
- (8) APFC 導入時には、同時に SC に直列リアクトルを導入するものとし、その容量は SC 容量の 6%とした。
- (9) 配電システム全体の合計有効電力の最大値は 3000kW とした。
- (10) 配電用変電所一次側の第 5 調波電圧は、回路電圧(6.6kV)に対して 0%と 1%の場合を想定した。
- (11) 各高圧需要家の第 5 調波流出電流の位相は、配電用変電所一次側に想定する第 5 調波電圧に対して 180° であるとした。
- (12) シミュレーションは、高圧需要家および配電システムが三相平衡であると仮定し、一相分の等価回路に換算して実施した。

表 4.5 高圧需要家のシミュレーション条件

Table 4.5 Conditions of each HV consumer

需要家No.	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
業種	事務所	製造業	学校	事務所	製造業	店舗	事務所
契約電力 [kW]	200	250	200	150	350	250	200
SC容量 [kvar]	80	250	100	50	300	100	80
高調波発生パターン(図4.8)	(a)	(b)	(a)	(a)	(c)	(a)	(a)
第5調波電流最大値[mA/kW]	4.7	4.3	3.8	3.2	3.5	4.1	4.5
需要家No.	C8	C9	C10	C11	C12	C13	—
業種	製造業	店舗	店舗	製造業	事務所	事務所	—
契約電力 [kW]	400	150	200	300	200	150	—
SC容量 [kvar]	350	50	100	250	100	50	—
高調波発生パターン(図4.8)	(a)	(a)	(b)	(a)	(c)	(a)	—
第5調波電流最大値[mA/kW]	5.0	4.2	3.4	3.0	3.6	4.0	—

表 4.5 に高圧需要家のシミュレーション条件を示す。表 4.5 を高圧需要家の基本条件としたうえで、各需要家の SC に対して表 4.6 に示した 4 通りのケースについてシミュレーションを行った。表 4.6 におけるケース 1 は高圧需要家への APFC の導入が進んでいない現状の条件であり、SC への直列リアクトル設置率（以下、IRSR(installation ratio of series reactor)とする）を、文献 2 の調査結果を参考に 20%とした条件である。ここで、IRSR は配電系統に接続された全 SC 容量に対して直列リアクトルが設置されている SC 容量の比率である。ケース 1 では、具体的には図 4.10 において 1 需要家（C8）のみに直列リアクトル及び APFC が設置されているものとした。ケース 2 は、ケース 1 に対して高調波流出電流が大きい順に 4 需要家（C1, C2, C7, C9）に直列リアクトル及び APFC を追加導入した場合であり、IRSR は 45%である。またケース 3 は、13 軒すべての高圧需要家に直列リアクトル及び APFC を導入した場合であり、IRSR は 100%となる。ケース 4 は、ケース 1 に対して高調波流出電流が大きい順に 4 需要家に直列リアクトルのみを導入した場合であり、SC は全設置容量が常時高圧母線に投入されている。これはケース 2 において APFC を動作させない場合と同じ条件である。

表 4.6 SC に関するシミュレーション条件

Table 4.6 Simulation cases about SC in consumers

No.	APFC 導入条件
ケース 1	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1 需要家 (C8) のみに APFC を導入 ・ APFC 導入需要家以外は直列リアクトルなし SC を常時投入 ・ 現状の APFC 普及率を模擬
ケース 2	<ul style="list-style-type: none"> ・ ケース 1 に対して高調波流出電流が大きい順に 4 需要家 (C1, C2, C7, C9) に直列リアクトル及び APFC を導入 ・ APFC 導入需要家以外は直列リアクトルなし SC を常時投入
ケース 3	<ul style="list-style-type: none"> ・ 全 13 需要家に APFC を導入
ケース 4	<ul style="list-style-type: none"> ・ ケース 1 に対して高調波流出電流が大きい順に 4 需要家 (C1, C2, C7, C9) に直列リアクトルあり SC を常時投入 ・ ケース 2 で APFC を動作させない場合と同等

4.5.2 シミュレーション結果 - 配電用変電所一次側に第 5 調波電圧がない場合 -

図 4.11 に配電用変電所一次側の第 5 調波電圧を 0%とした場合の、配電系統末端に接続された需要家 13(C13)の受電点における、第 5 調波電圧の 1 日の時間変化を示す。また、図 4.12 は配電用変電所の送り出し点における第 5 調波電流の 1 日の時間変化を示す。ケース 1 の第 5 調波電圧は、夜間は約 40V であるが昼間は約 95V であり、夜間より昼間の値が大きい傾向は事務所や工場等の有効電力の時間変化と同様である。一方ケース 2 の第 5 調波電圧は 1 日を通してケース 1 の約 75%に減少し、最大値は 73V となった。さらにケース 3 はケース 2 よりもさらに 10V から 50V 程度小さく、ケース 1 の約 45%に減少した。この結果は、高圧需要家に APFC および直列リアクトルを導入することで配電系統末端の第 5 調波電圧の抑制に効果があり、IRSR を高くするほど効果が大きくなること示している。

図 4.12 の第 5 調波電流は、いずれのケースにおいても図 4.11 の第 5 調波電圧と同様の時間変化をしている。また第 5 調波電流値は、ケース 2 ではケース 1 の約 70%に、ケース 3 ではケース 1 の約 37%に減少した。

図 4.11 において、ケース 2 とケース 4 比較すると、8時から17時あたりの昼間ではケース 2 とケース 4 はほぼ同程度であるが、それ以外の時間帯である夜間ではケース 4 はケース 2 より 10V 程度小さくなっていることが分かる。ケース 2 では、夜間に軽負荷になると

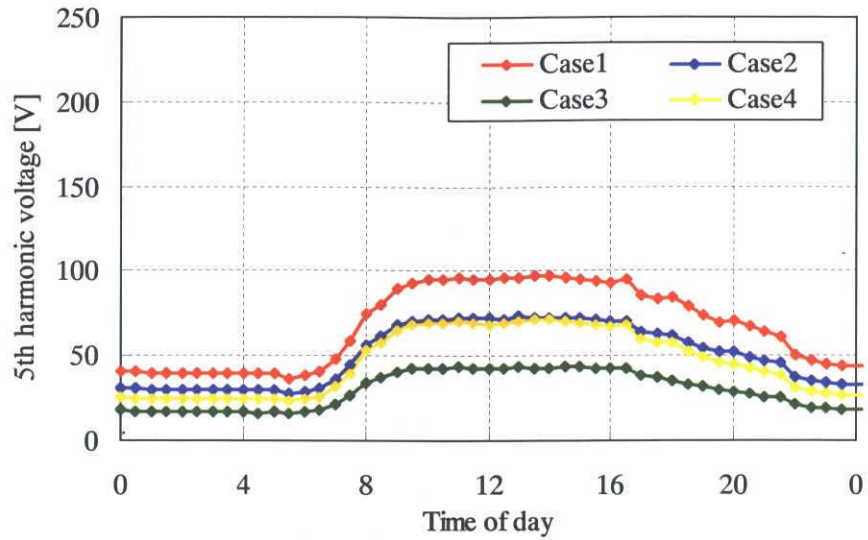


図 4.11 需要家 13 の受電点における第 5 調波電圧の時間変化

Fig.4.11 Trend of 5th harmonic voltage of consumer 13 without the primary 5th harmonic voltage

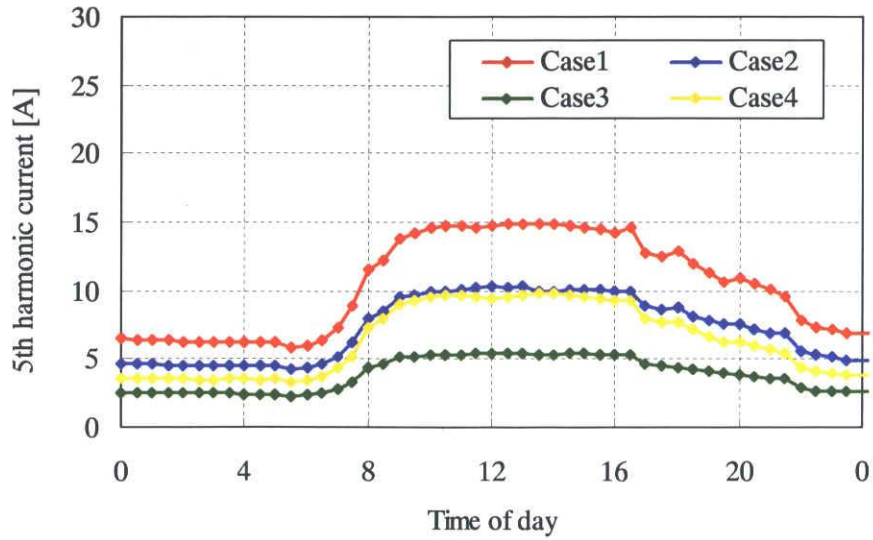


図 4.12 配電用変電所における第 5 調波電流の時間変化

Fig.4.12 Trend of 5th harmonic current of the distribution substation without the primary 5th harmonic voltage

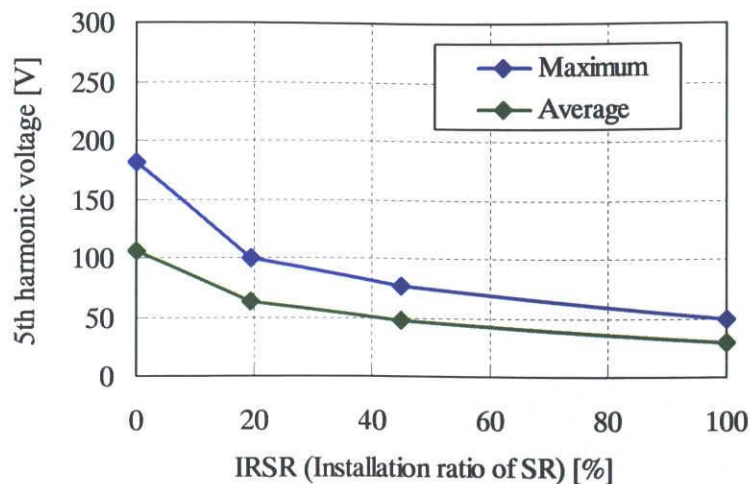


図 4.13 直列リアクトル設置率と第 5 調波電圧の関係

Fig.4.13 Relation between IRSR and 5th harmonic voltage on distribution line

昼間に投入されていた SC のうち APFC を導入している高圧需要家の直列リアクトル付 SC のみが開放されるため、結果的に IRSR は減少する。これに対してケース 4 では直列リアクトル付 SC は常時配電系統に接続されているため、IRSR は 1 日を通じて変化しない。したがって、夜間ではケース 4 の IRSR はケース 2 の IRSR よりも大きくなるため第 5 調波電圧も小さくなる。

図 4.13 に IRSR と第 5 調波電圧の関係を示す。最大値は全 13 需要家の受電点の 1 日を通しての最大値であり、平均値は同じく全 13 需要家の受電点の 1 日を通しての平均値である。図 4.13 から分かるように、IRSR が 0 から 20% に増加すると、第 5 調波電圧は最大値で 55%、平均値で 60% に減少できる。また IRSR が 0 から 20% に増加する場合は、最も第 5 調波電圧の減少度合いが大きいことが分かる。IRSR が 20% というのは、本研究でのシミュレーション条件では配電系統の現状の APFC 普及率を表す条件である。しかしながら、契約電力 200kW 未満程度の小規模需要家が集中したような配電系統では IRSR は 20% よりもさらに小さいと考えられる。したがって、配電系統の高調波電圧抑制の観点では、IRSR がより小さい配電系統に対して優先的に APFC ならびに直列リアクトルの導入を進めることが、より効率的な高調波電圧抑制に結びつくといえる。

4.5.3 シミュレーション結果 - 配電用変電所一次側に第5調波電圧がある場合 -

図 4.14 と図 4.15 に、配電用変電所一次側に 1%の第 5 調波電圧がある場合のシミュレーション結果を示す。第 5 調波電圧は 1 日を通して一定とした。図 4.14 では、ケース 1 の第 5 調波電圧は 120V から 150V の間を推移している。図 4.11 と比較して変化が小さいのは、配電用変電所から系統に末端に向けて流れる高調波電流と、高圧需要家から配電用変電所に向けて流れる高調波電流が混在し、両者の位相差によって打ち消し合っているためである。1%の第 5 調波電圧は実効値では 66V に相当する。したがってケース 1 では、配電系統末端の第 5 調波電圧は、配電用変電所一次側の 2 倍以上に大きくなっている。ケース 2 はケース 1 の約 70%に減少しており、さらにケース 3 はケース 1 の約 38%に減少している。図 4.15 の第 5 調波電流値はケース 2 ではケース 1 の約 50~60%に、ケース 3 ではケース 1 の約 30~60%に減少した。したがって、配電用変電所一次側に第 5 調波電圧がある場合においても、高圧需要家の SC に APFC ならびに直列リアクトルを導入することで、配電系統の第 5 調波電圧の抑制が可能であることが確認できた。

図 4.14 においてケース 2 とケース 4 を比較すると、両者の夜間の第 5 調波電圧の差は、図 4.11 と比較して大きくなっており、ケース 4 はケース 2 の約 75%に減少している。夜間の第 5 調波電圧の大部分は配電用変電所一次側の第 5 調波電圧に起因しており、夜間のケース 4 の IRSR はケース 2 よりも大きいことから、ケース 4 では配電用変電所一次側の第 5 調波電圧に起因する成分を抑制しているといえる。この結果は、配電用変電所一次側に 1%程度の第 5 調波電圧がある場合には、直列リアクトル付 SC を夜間にも積極的に投入しておくことが、第 5 調波電圧の抑制には有効であることを意味している。つまり、APFC の制御において、個別の APFC が高圧需要家受電点の力率が 1 よりも進みとなるように投入 SC 容量を調整するだけでなく、配電系統全体の力率が過剰な進みとならない（過剰な電圧上昇が発生しない）程度に、投入する直列リアクトル付 SC 容量を系統全体で調整することで、高調波電圧をさらに低減できる可能性がある。

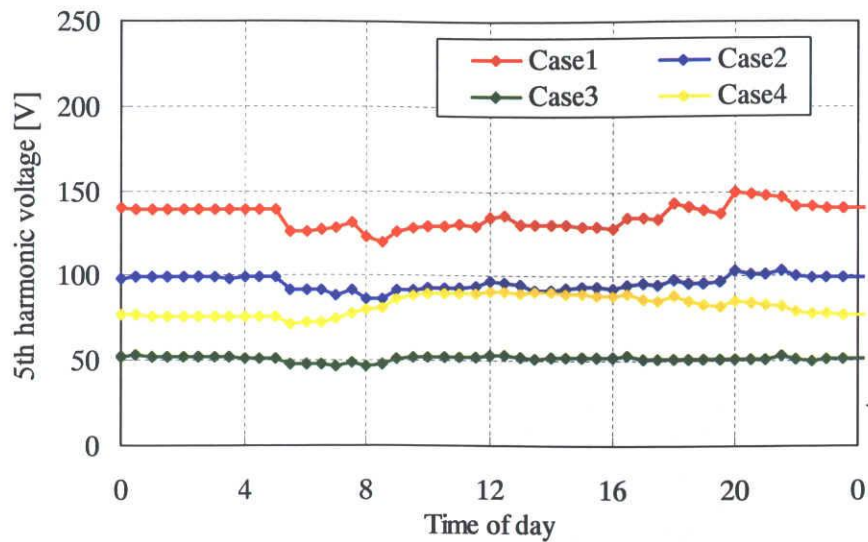


図 4.14 配電用変電所に第 5 調波電圧がある場合の
 需要家 13 の受電点における第 5 調波電圧の時間変化

Fig.4.14 Trend of 5th harmonic voltage of consumer 13
 with the primary 5th harmonic voltage of 1%

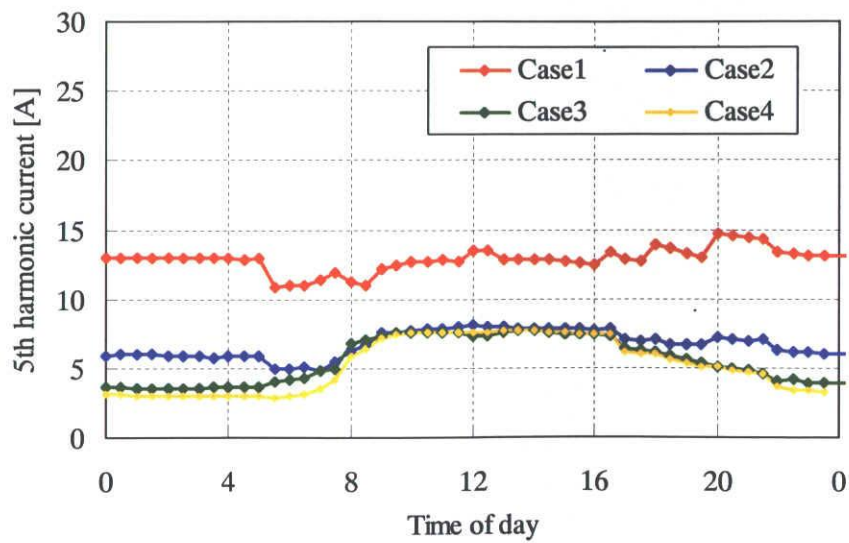


図 4.15 配電用変電所に第 5 調波電圧がある場合の
 配電用変電所における第 5 調波電流の時間変化

Fig.4.15 Trend of 5th harmonic current of the distribution substation
 with the primary 5th harmonic voltage of 1%

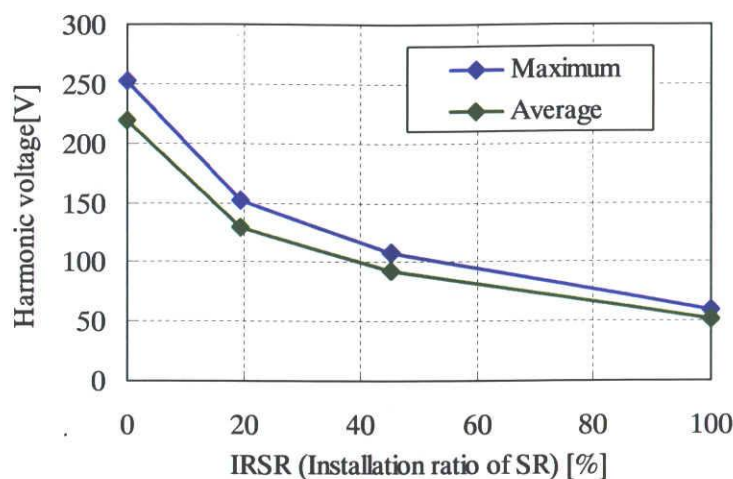


図 4.16 配電用変電所に第 5 調波電圧がある場合の
直列リアクトル設置率と第 5 調波電圧の関係

Fig.4.16 Relation between IRSR and 5th harmonic voltage on distribution line
Considering 5th harmonic voltage on distribution substation

図 4.16 に配電用変電所一次側に 1%の第 5 調波電圧がある場合の IRSR と第 5 調波電圧の関係を、図 4.13 と同様なグラフで示す。図 4.16 から分かるように、図 4.13 と同様に IRSR が大きいほど第 5 調波電圧は減少し、減少度合いは IRSR が 0 から 20%に増加するときが最も大きい。また IRSR が 100%の場合に、配電用変電所一次側の第 5 調波電圧（66V）とおおむね等しくなることが分かる。したがって、配電用変電所一次側に第 5 調波電圧がある場合には、ない場合と比較してより IRSR を大きくするように APFC ならびに直列リアクトルの導入を進めることが必要といえる。

4.6 結言

本章では、高圧需要家への APFC 導入による配電系統の高調波電圧抑制効果を定量的に評価することを目的とし、まず 8 軒の高圧需要家受電点での実測調査により、高圧需要家の高調波流出電流の実態を明らかにした。次に、配電系統の高調波の定量評価を目的とし、高圧需要家の高調波流出電流の実態を反映した簡易な高圧需要家モデルを提案した。さらに提案モデルを用いて、高圧需要家に APFC を導入した場合の配電系統の高調波電圧抑制効果を定量的に評価し、配電系統の高調波を効率的に抑制するための APFC 導入方策を検討した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 高圧需要家から流出する第5調波および第7調波電流は、実測した8軒のうち6軒においてガイドラインの上限値を超過していた。
- (2) 実測した8軒の高圧需要家における負荷機器全体の有効電力と高調波流出電流の関係は、正の相関、ステップ関数、一定の3通りに集約できた。そこでこの結果を用い、高調波発生源を有する高圧需要家の簡易モデルとして、上記の特性を有する高調波電流源用いたモデルを提案し、高圧需要家のSCへのAPFC導入による配電系統の高調波抑制効果をシミュレーションにより定量評価した。
- (3) 配電用変電所一次側に第5調波電圧がない場合には、APFC導入率を現状の約2倍(20%から45%)に増やすと、第5調波電圧を約75%に抑制できる。同様に配電用変電所一次側に1%の第5調波電圧がある場合には、第5調波電圧を約70%に抑制できる。
- (4) APFC導入率が0から20%に増加すると、第5調波電圧を最大値で55%、平均値で60%に抑制でき、導入前のAPFC導入率が低いほうが単位APFC導入あたりの抑制率が大きい。したがって、現状のAPFC導入率が低い配電系統に対して優先的に導入を進めることが、より効率的な高調波電圧抑制に結びつく。
- (5) 夜間の軽負荷時に直列リアクトル付SCを投入したままにしておくと、配電用変電所一次側に1%の第5調波電圧がある場合には、配電系統末端の第5調波電圧はAPFCにて直列リアクトル付SCを開放した場合に対して約75%に低減できる。したがって、APFCの制御手法として配電系統全体の力率が過剰な進みとならない程度に投入する直列リアクトル付SC容量を系統全体で調整することで、高調波電圧をさらに低減できる可能性がある。

本章では、1つの配電系統モデルに対してのシミュレーション結果を示したが、提案モデルの設定条件を実際の配電系統や高圧需要家に合わせてシミュレーションを行うことで、配電系統運用等の実務におけるAPFC導入方策の検討も可能である。

第 4 章 参考文献

- (1) 愛澤忠良：「配電線での高調波測定時の波形判定手法」，電学論 B, Vol.126, No.6, pp.586-591 (2006)
- (2) 需要設備専門部会：「高圧受電設備規程」，日本電気協会, JEAC8011-2008, pp.56-57 (2008)
- (3) 高圧受電設備高調波対策専門委員会：「高圧受電設備における高調波問題の現状と対策」，電気協同研究, 第 54 巻, 第 2 号, pp. 77-78 (1998)
- (4) 井上昌彦：「配電線負荷の第 5 調波電流発生源と負荷の等価回路推定手法」，電学論 B, Vol. 101, No. 8, pp.451-458 (1983)
- (5) 前田隆文：「時系列データによる負荷高調波特性の一定手法について」，平成 11 年電気学会電力・エネルギー部門大会, Vol.A, No.182, pp.474-475 (1999)
- (6) 林 泰弘, 松木 純也, 小林 賢一, 金尾 則一：「高調波解析用負荷モデルのパラメータ推定手法」，電学論 B, Vol. 125, No. 10, pp.939-947 (2005)
- (7) 原子力安全・保安院：「高圧又は特別高圧で受電する需要家の高調波抑制対策ガイドライン」(2004.1)
- (8) 電気技術基準調査委員会：「高調波抑制対策技術指針」，日本電気協会, JEAG9702-1995, p.85(1995)
- (9) 雪平謙二：「配電用変電所における高調波電流の方向別分離手法」，電学論 B, Vol. 117, No. 3, pp.308-315 (1997)
- (10) 高圧受電設備高調波対策専門委員会：「高圧受電設備における高調波問題の現状と対策」，電気協同研究, 第 54 巻, 第 2 号, pp. 13-15 (1998)
- (11) 高調波対策専門委員会：「電力系統における高調波とその対策」，電気協同研究, 第 46 巻, 第 2 号, p.136 (1990)
- (12) 高圧受電設備高調波対策専門委員会：「高圧受電設備における高調波問題の現状と対策」，電気協同研究, 第 54 巻, 第 2 号, p. 138 (1998)

第 5 章

高圧需要家の自動力率調整装置を活用した 電圧不平衡抑制

5.1 緒言

配電系統における電力品質問題の中では、電圧不平衡に起因する障害も多く報告されており⁽¹⁾、その内容は負荷機器の停止や誤動作、保護リレーの動作などである。また将来的な電力使用形態を考えると、近年の民生分野におけるオール電化住宅や太陽光発電の急速な普及により⁽²⁾、ヒートポンプ式給湯器などの夜間使用機器による単相電力需要の増大や、太陽光発電による単相電力の逆潮流等が想定される。これらが要因となることで、今後の配電系統における電圧不平衡の拡大が懸念される。従って電圧不平衡抑制対策の重要性が高まってくると考えられる。

一般的に配電系統の電圧制御は、配電用変電所におけるタップ調整や SVR (Step Voltage Regulator) などの電圧調整設備により行われている。しかしながら、これらの手法は三相一括で電圧を制御するため電圧不平衡の抑制は困難である。そのため電圧不平衡抑制対策としては、単相負荷の接続相の均等化や線路インピーダンスの平衡化などによる不平衡発生要因の抑制、または SVC (Static Var Compensator) などの無効電力補償装置の設置による電圧調整がある⁽³⁾。しかし、現実的な対策としては、電圧不平衡による障害発生時に、柱上変圧器等の単相負荷の接続替えが行われている程度である⁽⁴⁾。電圧不平衡の主たる発生要因は負荷電流の不平衡であることから、負荷設備を使用する需要家側での対策が適正になされることが望ましい。具体的には、三相 3 線式における不平衡負荷の限度を、設備不平衡率で 30% 以下とすることが、内線規程により勧告されており⁽⁵⁾、需要家はこの勧告に基づき負荷設備を設置する必要がある。しかしながら、この勧告はあくまでも設置される負荷設備容量に対するものであり、負荷稼動時の需要家における不平衡の実態は、これまでほとんど明らかとなっていない。

本論文では、配電システムの電力品質に多大な影響を与える進相コンデンサ（以下、SC とする）に着目し、第 2 章から第 4 章において SC の適正容量選定や SC への自動力率調整装置（以下、APFC とする）の導入という既存技術の電圧上昇、配電損失、高調波抑制効果を定量的に明らかにしてきた。電力品質維持向上を目的として適正な SC 設備を普及させるには、SC を活用した新しい電力品質向上技術の開発が重要である。高圧需要家の SC は一般的に三相機器であることから、通常の APFC では三相同一容量での無効電力調整しか行われない。そのため、SC の電圧不平衡抑制への活用はこれまであまり論じられることがなく、過剰な SC の設置やそれによる進み力率が電圧不平衡に与える影響も明らかとはなっていない。これらを明確にするとともに SC を電圧不平衡抑制に活用できれば、より効率的な電力品質維持向上や適正な SC 設備普及の一助となると考えられる。

このような背景を踏まえ、本章ではまず高圧需要家における実測調査により電圧や電流の不平衡の実態を明らかにした。そして、SC を活用した電圧不平衡抑制の一手法として、従来の三相一括で SC 容量を調整する APFC に対して、相毎に SC 容量を調整する APFC を提案した。さらに、高圧需要家に両者を導入した場合の力率と電圧不平衡の関係をシミュレーションにより明らかにし、提案手法が電圧不平衡抑制に寄与することを示した。

5.2 高圧需要家における不平衡の実測

5.2.1 実測方法

第 4 章の表 4.3 に示した実測対象需要家における各相電圧や電流の実測データを用いて、電圧や電流の不平衡の実態を分析した。

5.2.2 不平衡率の定義と評価方法

本章では、不平衡の評価指標として逆相分と正相分の比で定義される不平衡率を用いた⁽⁶⁾。電圧不平衡率 V_K の計算式を以下に示す。

$$V_K = \frac{V_2}{V_1} \times 100 [\%] \quad (5.1)$$

$$V_1 = \sqrt{\frac{1}{6}(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2) + \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{V_s(V_s - V_{ab})(V_s - V_{bc})(V_s - V_{ca})}} \quad (5.2)$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{1}{6}(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2) - \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{V_s(V_s - V_{ab})(V_s - V_{bc})(V_s - V_{ca})}} \quad (5.3)$$

$$V_s = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{2} \quad (5.4)$$

ここで、

V_1 : 正相電圧 V_2 : 逆相電圧

V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} : 各線間電圧

電流不平衡率 I_K は、(5.1)から(5.4)式において正相電圧、逆相電圧、各線間電圧を、それぞれ正相電流、逆相電流、各線電流に置き換えて計算する。

また、受電点での電流実測値から算出した電流不平衡率（以下、受電電流不平衡率とする）には、SC に供給される無効電流の影響が含まれている。そこで、実測値から SC の無効電流を差し引いた上で電流不平衡率（以下、負荷電流不平衡率とする）を算出した。

本章では、実測により得られる負荷電流不平衡率を、内線規程に示された設備不平衡率の限度値である 30% と比較することとした。ここで、設備不平衡率の定義⁽⁵⁾は、(5.5)式のとおり線間に接続される設備容量で定義されていることから、負荷電流不平衡率を設備不平衡率に一義に換算することは困難である。

$$S_K = \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{ave}} \times 100 [\%] \quad (5.5)$$

ここで、

S_{max} : 各線間の負荷設備容量の最大値

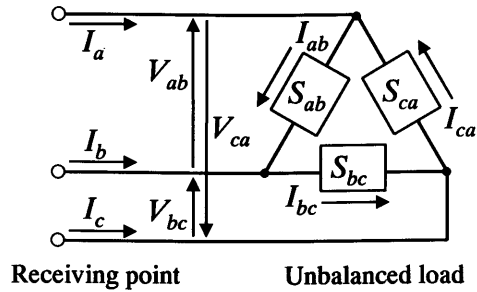
S_{min} : 各線間の負荷設備容量の最小値

S_{ave} : 各線間の負荷設備容量の平均値

そこで、平均的な力率の負荷が、設備不平衡率 30% に相当する負荷容量で不平衡に接続された場合の負荷電流不平衡率を算出して比較することとした。負荷の平均的な力率は、2.2.4 項で示した三相変圧器の平均力率である遅れ 0.90 と単相変圧器の平均力率である遅れ 0.97 の 2 種類を想定した。そして各線間にこの 2 種類の負荷を接続し、三相合計電力一定、設備不平衡率 30% となるように負荷容量を変化させ、負荷電流不平衡率が取りうる最大値を求めた。以下に、具体的な手順を示す。

(1) 設備不平衡率と負荷電流不平衡率の算出式

図 5.1 に示すような三相不平衡負荷を考える。ここで、ab 線間、bc 線間、ca 線間に接続される負荷電力をそれぞれ次式のように定義する。



S_{ab}, S_{bc}, S_{ca} : 線間負荷電力
 I_a, I_b, I_c : 線電流
 I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} : 線間負荷電流
 V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} : 線間電圧

図 5.1 三相不平衡負荷の電圧と電流

Fig.5.1 Voltages and currents of three-phase unbalanced load

$$\begin{cases} \dot{S}_{ab} = P_{ab} + jQ_{ab} \\ \dot{S}_{bc} = P_{bc} + jQ_{bc} \\ \dot{S}_{ca} = P_{ca} + jQ_{ca} \end{cases} \quad (5.6)$$

ここで,

P_{ab}, P_{bc}, P_{ca} : 各線間の負荷の有効電力

Q_{ab}, Q_{bc}, Q_{ca} : 各線間の負荷の無効電力

なお, $\dot{S}_{ab}, \dot{S}_{bc}, \dot{S}_{ca}$ の大きさを表す S_{ab}, S_{bc}, S_{ca} は, $S_{ab} \geq S_{bc} \geq S_{ca}$ の関係であるとする。

設備不平衡率 S_K は, 内線規程の定義に基づき, 次式にて計算することができる。

$$S_K = \frac{S_{ab} - S_{ca}}{(S_{ab} + S_{bc} + S_{ca})/3} \quad (5.7)$$

次に, 各線電流は負荷電力と線間電圧を用いて, 次式にて計算することができる。

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{S}_{ab}}{\dot{V}_{ab}} - \frac{\dot{S}_{ca}}{\dot{V}_{ca}} = \frac{P_{ab} + jQ_{ab}}{\dot{V}_{ab}} - \frac{P_{ca} + jQ_{ca}}{\dot{V}_{ca}} \quad (5.8)$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = \frac{\dot{S}_{bc}}{\dot{V}_{bc}} - \frac{\dot{S}_{ab}}{\dot{V}_{ab}} = \frac{P_{bc} + jQ_{bc}}{\dot{V}_{bc}} - \frac{P_{ab} + jQ_{ab}}{\dot{V}_{ab}} \quad (5.9)$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{S}_{ca}}{\dot{V}_{ca}} - \frac{\dot{S}_{bc}}{\dot{V}_{bc}} = \frac{P_{ca} + jQ_{ca}}{\dot{V}_{ca}} - \frac{P_{bc} + jQ_{bc}}{\dot{V}_{bc}} \quad (5.10)$$

これらの各線電流から, 次の(5.11)~(5.14)式を用いて負荷電流不平衡率 I_K を算出することができる。

$$I_K = \frac{I_2}{I_1} \times 100 [\%] \quad (5.11)$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{6}(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) + \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{I_s(I_s - I_a)(I_s - I_b)(I_s - I_c)}} \quad (5.12)$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{6}(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) - \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{I_s(I_s - I_a)(I_s - I_b)(I_s - I_c)}} \quad (5.13)$$

$$I_s = \frac{I_a + I_b + I_c}{2} \quad (5.14)$$

ここで, I_1 : 正相電流 I_2 : 逆相電流

したがって, \dot{S}_{ab} , \dot{S}_{bc} , \dot{S}_{ca} のさまざまな組み合わせに対して, S_K と I_K の両方を算出することで, 両者の関係を求めることができる。

(2) 設備不平衡率と負荷電流不平衡率の関係の導出

ここでは, S_K の値を条件として与えて \dot{S}_{ab} , \dot{S}_{bc} , \dot{S}_{ca} を決定し, I_K を算出した。まず, 三相合計電力 S を次式で定義する。

$$S = S_{ab} + S_{bc} + S_{ca} \quad (5.15)$$

(5.15)式と(5.7)式を用いると, S_K は次式で計算することができる。

$$S_K = \frac{S_{ab} - S_{ca}}{S/3} \quad (5.16)$$

ここで, S と S_K を与えるだけでは, (5.15)式と(5.16)式を用いて, S_{ab} , S_{bc} , S_{ca} の組み合わせを一義に決定することはできない。そこで, S_{ab} を最大電力, S_{bc} を中間電力, S_{ca} を最小電力とよぶこととし, 中間電力と最大電力と最小電力の関係について, 次式のような定義を導入する。

$$S_{bc} = \frac{1}{2} \{ (1 + S_N) S_{ab} + (1 - S_N) S_{ca} \} \quad (5.17)$$

ここで, S_N を中間電力比率とよぶこととする。 $S_N=0$ の場合には, 中間電力は最大電力と最小電力の中間値となり, $S_N=1$ の場合には, 中間電力は最大電力と等しくなり, $S_N=-1$ の場合には, 中間電力は最小電力と等しくなる。

(5.15)~(5.17)式を連立して解くことにより, 次の(5.18)~(5.20)式を得る。これらの式を用いることで, S , S_K , S_N を与えれば, S_{ab} , S_{bc} , S_{ca} の組み合わせを一義に決定することができる。

$$S_{ab} = \frac{S}{3} \left(1 + \frac{1}{2} S_K - \frac{1}{6} S_K S_N \right) \quad (5.18)$$

$$S_{bc} = \frac{S}{3} \left(1 + \frac{1}{3} S_K S_N \right) \quad (5.19)$$

$$S_{ca} = \frac{S}{3} \left(1 - \frac{1}{2} S_K - \frac{1}{6} S_K S_N \right) \quad (5.20)$$

次に、 S_{ab} 、 S_{bc} 、 S_{ca} は皮相電力の大きさであるため、各線間の力率を与えることで、有効電力と無効電力を決定する。 S_{ab} 、 S_{bc} 、 S_{ca} の力率を $\cos\theta_{ab}$ 、 $\cos\theta_{bc}$ 、 $\cos\theta_{ca}$ とすると、各線間の有効電力と無効電力は次式で求めることができる。

$$\begin{cases} P_{ab} = S_{ab} \cos\theta_{ab} \\ P_{bc} = S_{bc} \cos\theta_{bc} \\ P_{ca} = S_{ca} \cos\theta_{ca} \end{cases} \quad (5.21)$$

$$\begin{cases} Q_{ab} = S_{ab} \sqrt{1 - \cos^2\theta_{ab}} \\ Q_{bc} = S_{bc} \sqrt{1 - \cos^2\theta_{bc}} \\ Q_{ca} = S_{ca} \sqrt{1 - \cos^2\theta_{ca}} \end{cases} \quad (5.22)$$

よって、(5.21)(5.22)式と(5.8)～(5.14)式を用いて、 I_K を求めることができる。

なお(5.18)～(5.20)式から分かるように、 S_{ab} 、 S_{bc} 、 S_{ca} は S および S_K と S_N で決定される定数の乗算で表現されていることから、 I_K は S に無関係に定まる。

よって以上をまとめると、負荷条件として設備不平衡率 S_K を与え、これ以外に、 S_N 、 $\cos\theta_{ab}$ 、 $\cos\theta_{bc}$ 、 $\cos\theta_{ca}$ を与えれば、その負荷条件における I_K を求めることができる。

そこで、 S_K 、 S_N 、 $\cos\theta_{ab}$ 、 $\cos\theta_{bc}$ 、 $\cos\theta_{ca}$ を表5.1の範囲で変化させた場合の、すべての組み合わせに対して I_K を求め、 S_K を横軸に I_K を縦軸とした平面に S_K と I_K の範囲を示したのが図5.2である。なお表5.1における力率の範囲は、2.2.4項で示した三相変圧器平均力率の遅れ0.90、単相変圧器平均力率の遅れ0.97、およびこれらの中間値とした。

図5.2において、 S_K が30%の場合には、 I_K は2%から17%までの値を取りうる事が分かる。このことは、 I_K が17%を超過する場合には、 S_K は30%を超過していると判断できることを意味している。よって、本章ではこの結果を用いて、 I_K を評価する。

表 5.1 負荷条件の範囲

Table 5.1 Range of load parameters

負荷条件	範囲
S_K	0~100%の範囲で 10%刻み
S_N	-100~100%の範囲で 20%刻み
$\cos\theta_{ab}$ $\cos\theta_{bc}$ $\cos\theta_{ca}$	0.900, 0.935, 0.970 いずれも遅れ力率

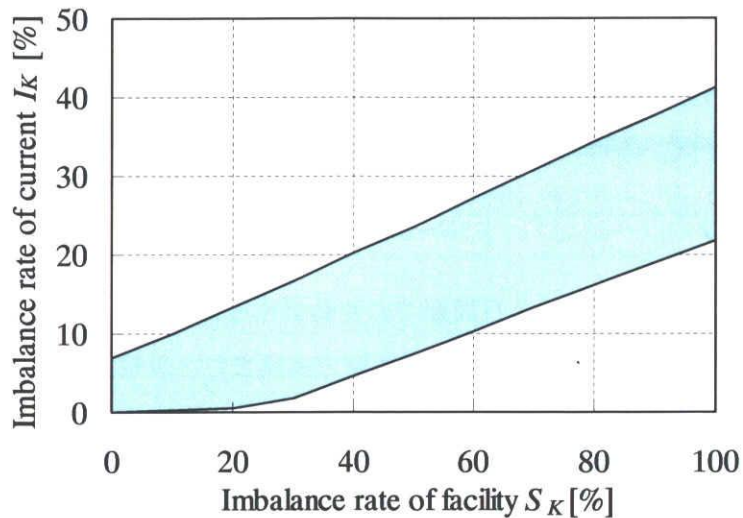


図 5.2 設備不平衡率と負荷電流不平衡率の関係

Fig.5.2 Relation between imbalance ratio of facility and imbalance rate of current

5.2.3 実測結果

図 5.3 に、実測した 8 軒の需要家における受電電圧不平衡率の平均値の時間変化を、季節別及び平日休日別に示す。この平均値は、需要家毎に 5 分毎の実測値を 1 時間単位で平均した上で、それらを 8 軒分平均することにより求めた。受電電圧不平衡率の平均値はおおむね 0.35~0.60%の範囲である。また 1 日の変化では、季節別や平日休日別で細かい違いが見られるものの、総じて早朝 5 時~6 時あたりに最小となり、夕方の 16 時~20

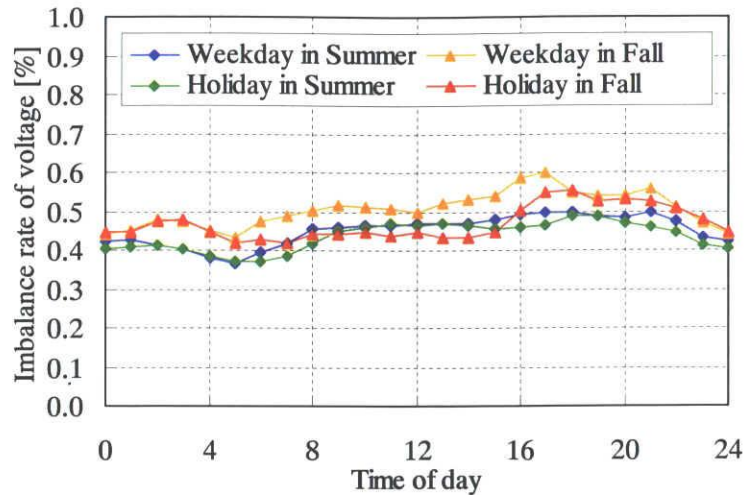


図 5.3 実測需要家の受電電圧不平衡率平均値の時間変化

Fig. 5.3 Average of imbalance rate of voltage at receiving points in measured consumers

時あたりに最大となるような、1日周期での変動が見られることが分かる。この変動の傾向は、文献 1 で示されている約 100 軒の需要家で実測された受電電圧不平衡率の平均値とおおむね同様である。

図 5.4 に、実測した 8 軒の需要家における受電電流不平衡率の平均値の時間変化を示す。平均値の算出方法は図 5.3 と同様である。図 5.4 より、夏季、中間季ともに、電力使用量が多い平日の 8 時～22 時には、受電電流不平衡率が 25%～30%であるが、それ以外の軽負荷時間帯では 20%程度であることが分かる。このように軽負荷時間帯の値のほうが小さい傾向があるのは、不平衡である負荷電流に対して、平衡である SC 電流の比率が大きくなるためであると考えられる。

図 5.5 に、実測した 8 軒の需要家のそれぞれにおいて、SC 電流の影響を取り除いた負荷電流不平衡率を求め、それらの平均値の時間変化を示す。平衡である SC 電流のみが取り除かれるため、図 5.4 と比較すると不平衡率の値は全体的に大きくなり、夏季は 27～44%、中間季は 41～61%である。また平日、休日に関係なく、負荷電流不平衡率は電力使用量が少ない中間季の方が大きい。また、夏季、中間季、平日、休日のすべての場合における、負荷電流不平衡率の最小値は 27%であった。

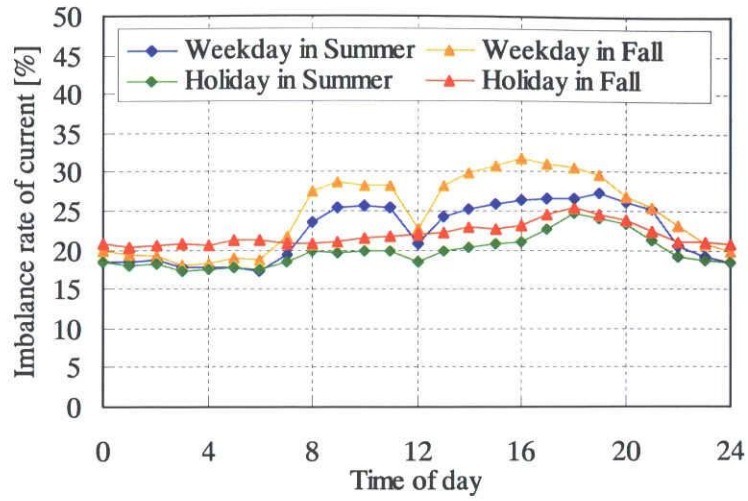


図 5.4 実測需要家の受電電流不平衡率平均値の時間変化

Fig. 5.4 Average of imbalance rate of current at receiving points in measured consumers

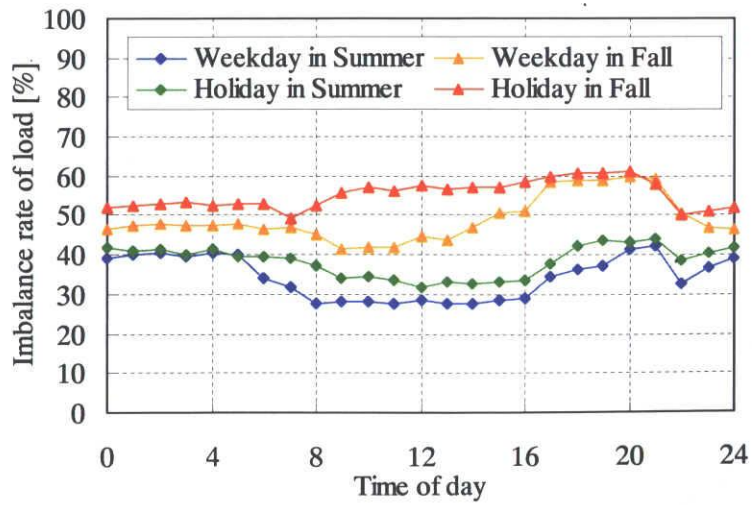


図 5.5 実測需要家の負荷電流不平衡率平均値の時間変化

Fig. 5.5 Average of imbalance rate of current of load in measured consumers

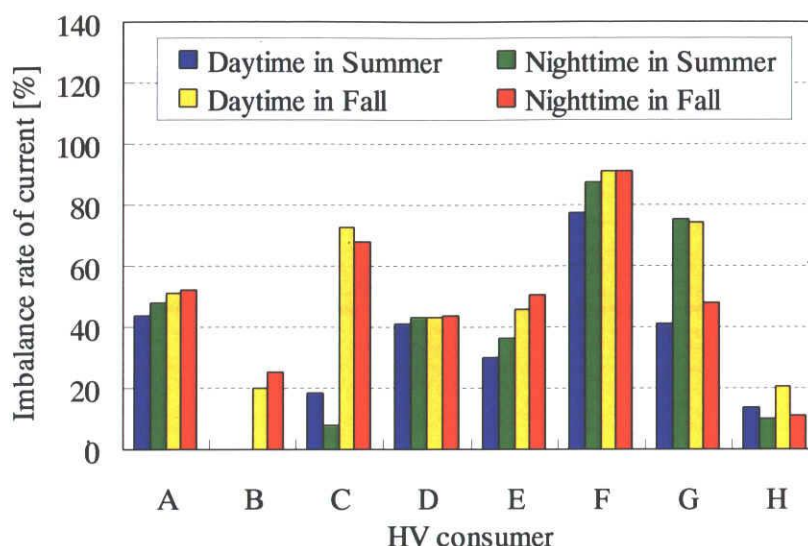


図 5.6 各需要家の負荷電流不平衡率の平均値

Fig. 5.6 Imbalance rate of current of each consumer

5.2.4 負荷電流不平衡率の評価

図 5.6 に、季節別、時間帯別に求めた需要家毎の負荷電流不平衡率の平均値を示す。これらの値を、5.2.2 項にて算出した設備不平衡率の限度値 30% の負荷電流不平衡率への換算値である 17% と比較した。すなわち、負荷電流不平衡率が 17% を超えた場合には、設備不平衡率の限度値 30% を超えていると判断した。このような方法で図 5.6 を評価すると、8 軒すべての需要家において、いずれかの時間帯または季節に設備不平衡率の限度値を超えていることが分かる。この結果から、需要家での不平衡抑制のためには、設備不平衡率を指標とした設計時の対策を行うだけでなく、負荷稼動状況が変化しても不平衡の増大を抑制できるような、運用時の対策も検討されることが望ましいといえる。

5.3 進相コンデンサを活用した電圧不平衡抑制手法の検討

5.3.1 検討内容

既存の需要家での不平衡抑制対策の 1 つとして、単相負荷機器の接続相の変更がある。しかし、実際に多数の負荷機器が稼動している需要家では、負荷機器を停止して接続相の変更を行うことは困難である場合が多い。また単相負荷機器毎の稼働率が異なる場合には、定格容量では平衡であっても稼働容量は不平衡となったり、不平衡の程度が時間毎に変化することもある。したがって、負荷機器の稼働状態の変化に合わせて調整が可能な不平衡

抑制対策が望まれる。

そこで本章では、需要家の SC 容量が負荷機器の稼動状態に合わせ比較的容易に調整可能であることに着目した。そして、SC を電圧不平衡抑制に活用するための一手法として、従来の三相一括で SC 容量を調整する APFC に対して、相毎に SC 容量を調整する APFC を提案する。さらに、高圧需要家に両者を導入した場合の力率と電圧不平衡率の関係をシミュレーションにより評価し、相毎に SC 容量を調整する APFC の効果を検討する。

5.3.2 進相コンデンサ容量調整法

評価対象とした 2 種類の SC 容量調整法を具体的に説明する。

(1) 三相一括力率調整法

三相一括力率調整法 (T-APFC : Three phase APFC) は三相一括で SC 容量を調整するもので、従来の APFC で一般的に用いられている手法である。負荷の力率を $\cos \theta_1$ から $\cos \theta_2$ に改善するのに必要な負荷 1kW あたりの SC 容量 q は、次式で計算できる。

$$q = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_1} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_2} - 1} \quad (5.23)$$

(5.23)式をもとに、負荷の三相全体の有効電力が $P_{3\phi}$ 、力率が $\cos \theta_{13\phi}$ のとき、それを $\cos \theta_{23\phi}$ に改善するのに必要な SC 合計容量を(5.24)式により算出し、それを(5.25)式のように三相平衡で投入する。

$$Q_{3\phi} = P_{3\phi} \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_{13\phi}} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_{23\phi}} - 1} \right) \quad (5.24)$$

$$Q_R = Q_S = Q_T = \frac{1}{3} Q_{3\phi} \quad (5.25)$$

この手法では、負荷電流が不平衡である場合にも三相一括の力率を目標値として SC 容量を決定する。

(2) 相別力率調整法

相別力率調整法 (S-APFC : Single phase APFC) は、力率の目標値に対して SC を相毎に異容量で投入し、各相をすべて同一力率に調整する手法である。この相別力率調整法は、具体的には、各相の有効電力、力率をそれぞれ $P_R, \cos \theta_{1R}, P_S, \cos \theta_{1S}, P_T, \cos \theta_{1T}$ としたときに、各相には次式で計算される SC 容量を投入するものである。

$$Q_R = P_R \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_{1R}} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_{23\phi}} - 1} \right) \quad (5.26)$$

$$Q_S = P_S \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_{1S}} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_{23\phi}} - 1} \right) \quad (5.27)$$

$$Q_T = P_T \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_{1T}} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_{23\phi}} - 1} \right) \quad (5.28)$$

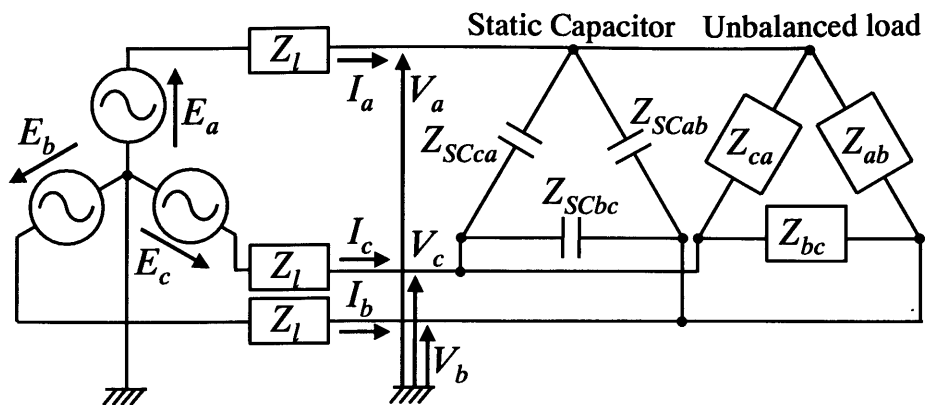
三相一括力率調整法では、投入される SC 容量により遅れ力率の相と進み力率の相が混在する場合があります、相間の電圧差が大きくなるが、相別力率調整法では各相の力率がすべて等しくなるので、三相一括力率調整法と比較して電圧差を小さくできると考えられる。

5.3.3 評価方法

前項で説明した 2 種類の SC 容量調整手法を高圧需要家に導入した場合の、力率と電圧不平衡率の関係をシミュレーションにより評価した。シミュレーションに用いた三相不平衡回路モデルを図 5.7 に示す。この回路モデルは、三相平衡の電圧源で表した配電用変電所のフィーダに、不平衡負荷を有する高圧需要家が接続されることを想定したものである。高圧需要家は各相間に接続された負荷と SC で模擬し、配電線インピーダンスは平衡とした。この回路モデルにおいて、負荷が不平衡である場合を想定し、2 種類の SC 容量調整手法の受電力率と受電電圧不平衡率 V_K の関係の評価した。なおシミュレーションの主目的を 2 種類の SC 容量調整手法の評価とし、SC 容量は連続的に調整できるものと仮定した。

配電システムに関する計算条件は表 5.2 のとおりとし、需要家に関する計算条件は、夏季と中間季を想定し、表 5.3 のとおりとした。表 5.3 の負荷電力は、配電システムに接続される需要家の合計電力を想定したものである。また設備不平衡率については、5.2.4 項にて実測結果は限度値を超過していると判断されたこと、および図 5.4 より中間季は夏季よりも負荷電流不平衡率が大きいことを考慮し、夏季を 40%、中間季を 60% と設定した。負荷の不平衡は、負荷電力の想定値を三相合計値として与え、一相分の負荷電力のみが大きく他の二相は同じ値となるように設定した。各相の具体的な電力は表 5.3 のとおりである。

なお需要家の負荷には、近年汎用インバータに代表される定電力特性を有する機器が増加している。そこでシミュレーションでは、負荷を定インピーダンス特性とした場合と定電力特性とした場合の両方を評価した。負荷を定インピーダンス特性とする場合には、そのインピーダンスは電圧 6600V において想定した電力となるように決定した。また、評価において、負荷力率をパラメータとして変化させる場合には、各相とも同一力率とした。



E_a, E_b, E_c : 配電用変電所電圧
 Z_l : 配電線インピーダンス
 $Z_{SCab}, Z_{SCbc}, Z_{SCca}$: SCインピーダンス
 Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca} : 負荷インピーダンス
 I_a, I_b, I_c : 線電流
 V_a, V_b, V_c : 需要家受電電圧

図 5.7 三相不平衡回路モデル

Fig. 5.7 Three-phase imbalanced circuit model

表 5.2 配電系統に関する計算条件

Table 5.2 Conditions of simulation of distribution system

項目	条件
電源電圧 E_a, E_b, E_c	$6600/\sqrt{3}$ V, 60Hz
配電線インピーダンス	$0.313 + j0.355 \Omega/\text{km}$
電源インピーダンス	$j0.389 \Omega$
配電線こう長	3km

表 5.3 需要家負荷電力の設定条件

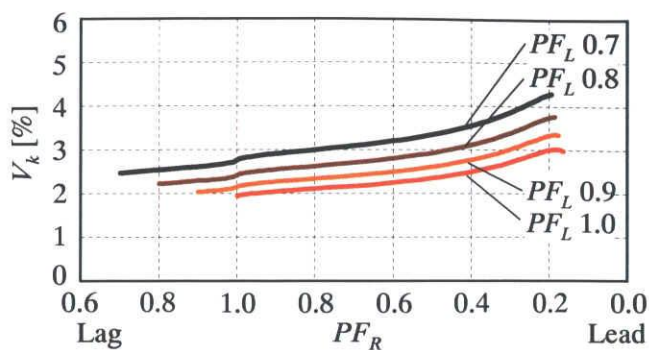
Table 5.3 Conditions of imbalanced load

条件	負荷電力 (三相合計値) [kW]	設備 不平衡率 [%]	各線間負荷電力[kW]		
			ab 間	bc 間	ca 間
夏季	4,000	40	1156	1156	1688
中間季	2,000	60	533	533	933

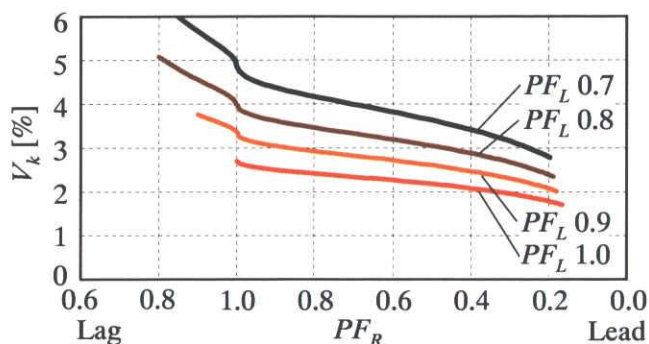
5.3.4 三相一括力率調整法の評価結果

三相一括力率調整法を用いて力率改善を行った場合の評価結果を示す。図 5.8 に、夏季の負荷条件において、負荷力率 PF_L をパラメータとしたときの、受電力率 PF_R と受電電圧不平衡率 V_k の関係を示す。ここで図 5.8 (a)は負荷を定インピーダンス特性とした場合、図 5.8 (b)は定電力特性とした場合である。図 5.8 において、グラフの曲線の左端は投入 SC 容量が 0kvar であり、受電力率は負荷力率と等しい。例えば、受電力率が遅れ 0.8 では、受電電圧不平衡率は 2.2% である。そして投入 SC 容量を増加していくと、受電力率は進み側に変化するため、曲線上を右側に移動する。ここで、図 5.8 (a)の定インピーダンス特性の場合には、力率が進みになるほど受電電圧不平衡率が増加していくことが分かる。この傾向は負荷力率を変えた場合（遅れ 0.9 及び遅れ 0.7）でも同様である。また、負荷力率が遅れであるほど、受電電圧不平衡率は大きくなっていることが分かる。負荷力率が 0.8 の場合には、受電力率が進み 0.4 のときに、受電電圧不平衡率が管理の目安である 3%⁽⁷⁾を超えている。

これに対し、図 5.8(b)の定電力特性の場合には、力率が進みになるほど受電電圧不平衡率が減少していくことが分かる。これは定インピーダンス特性の場合には、力率が進みになるにつれてフェランチ効果により受電電圧が上昇し、それに応じて負荷電流が大きくなるのに対して、定電力特性の場合には負荷電流が減少するためである。なお、実際の高压需要家では定インピーダンス特性の負荷と定電力特性の負荷が混在していることが多いと考えられる。その場合の受電力率による受電電圧不平衡率の変化の度合いは、(a)や(b)よりも小さくなる。



(a) 定インピーダンス特性負荷

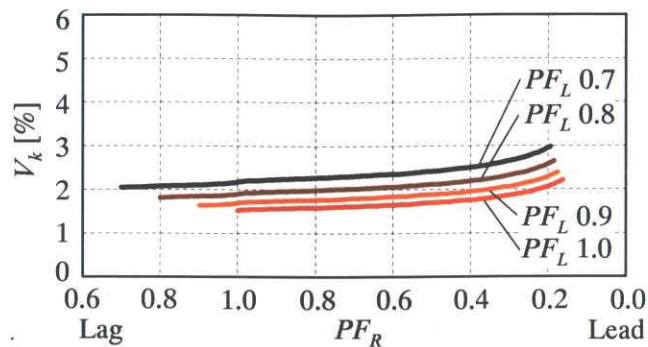


(b) 定電力特性負荷

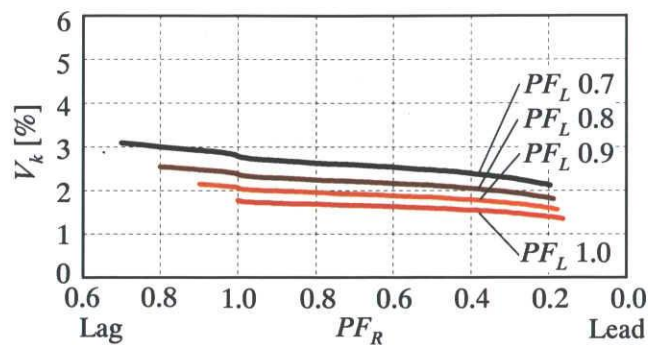
図 5.8 三相一括力率調整法を用いた場合の受電力率と電圧不平衡率（夏季）

Fig.5.8 Relation between PF_R and V_k by T-APFC 1 in summer

図 5.9 は、中間季の負荷条件における評価結果を、図 5.8 と同様に示したものである。図 5.8 と比較すると、負荷電流が小さいため受電電圧不平衡率も小さくなっているものの、力率が進みになるにつれて、定インピーダンス負荷の場合には受電電圧不平衡率が増加し、定電力負荷の場合には受電電圧不平衡率が減少する傾向は同様である。これらの結果から、三相一括力率調整法は負荷の特性により電圧不平衡に与える影響が異なり、需要家に定インピーダンス特性負荷が多い場合には、受電力率が過度に進みになると、配電系統の電圧不平衡を増加させる要因となりうるということが定量的に確認できた。



(a) 定インピーダンス特性負荷



(b) 定電力特性負荷

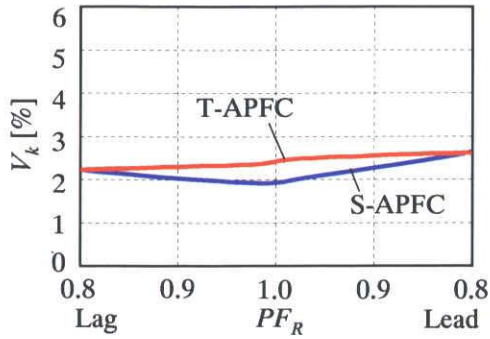
図 5.9 三相一括力率調整法を用いた場合の受電力率と電圧不平衡率（中間季）

Fig.5.9 Relation between PF_R and V_k by T-APFC in fall

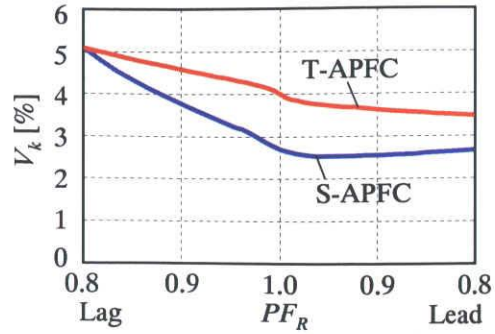
5.3.5 相別力率調整法の評価結果

次に相別力率調整法の評価結果を述べる。図 5.10 と図 5.11 に、負荷力率が遅れ 0.8 の場合における、受電力率と受電電圧不平衡率の関係を、三相一括力率調整法と相別力率調整法の両者について示す。各図における負荷電力と負荷力率と負荷モデルの対応は、図 5.8 や図 5.9 と同様である。

図 5.10 と図 5.11 の相別力率調整法のグラフを見ると、受電力率が 1 のときに、受電電圧不平衡率が最小となることが分かる。相別力率調整法では、各相は同一力率に調整される。このため需要家全体の電流は、負荷力率には無関係に受電力率のみで決まる。よって負荷



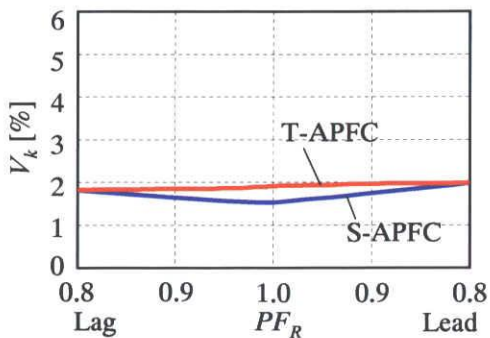
(a) 定インピーダンス特性負荷



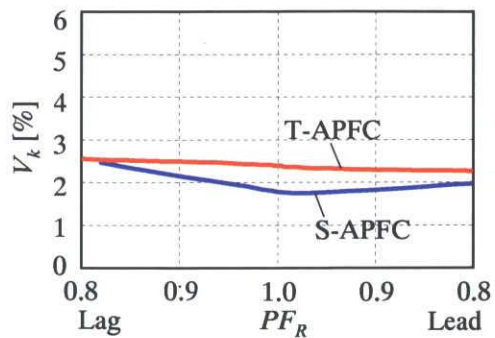
(b) 定電力特性負荷

図 5.10 三相一括力率調整法と相別力率調整法の電圧不平衡率の比較 (夏季)

Fig.5.10 Relation between PF_R and V_k by T-APFC and S-APFC method 2 in summer



(a) 定インピーダンス特性負荷



(b) 定電力特性負荷

図 5.11 三相一括力率調整法と相別力率調整法の電圧不平衡率の比較 (中間季)

Fig.5.11 Relation between PF_R and V_k by T-APFC and S-APFC in fall

力率が変わっても、受電力率と受電電圧不平衡率の関係は変わらない。

三相一括力率調整法と相別力率調整法を比較すると、図 5.10(a)では受電力率が遅れ 0.8 から進み 0.8 の範囲において、相別力率調整法の方が、受電電圧不平衡率は 0.5%程度小さくなるのが分かる。また図 5.10(b)でも同様に、相別力率調整法の方が、受電電圧不平衡率は小さくなるのが分かる。さらに図 5.11 においても、受電電圧不平衡率の大きさは異なるものの、相別力率調整法の方が受電電圧不平衡率を小さくなるのが分かる。このように受電力率を 1 に近い範囲に維持すれば、相別力率調整法は従来一般的である三相一括力率調整法よりも、受電電圧不平衡率の低減に寄与するといえる。

ただし、受電力率が過度な進みになると三相一括力率調整法の方が受電電圧不平衡率は小さくなる。これは、力率が過度な進みの場合には、不平衡負荷に対する平衡 SC の容量比

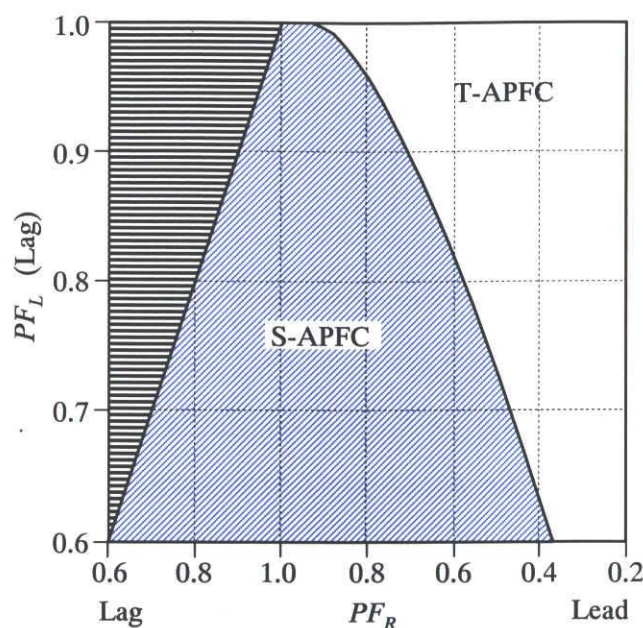


図 5.12 力率範囲による両手法の優位性

Fig. 5.12 Merit of each method with variation of power factors

率が高くなるためである。よって、どちらの調整法が受電電圧不平衡率の低減の観点で有利であるかは、負荷力率と受電力率の値によって異なってくる。

そこで、負荷力率と受電力率による、三相一括力率調整法と相別力率調整法との受電電圧不平衡率の差を明確にするために、負荷力率と受電力率を変化させたときの、両手法の優位性を評価した結果を図 5.12 に示す。

図 5.12 は、図 5.8 と同じ夏季の負荷条件で、縦軸を負荷力率、横軸を受電力率とした平面に、三相一括力率調整法と相別力率調整法のうちどちらの手法が受電電圧不平衡率を低くできるかを示した図である。図中の斜線部分は相別力率調整法、白色部分は三相一括力率調整法の方が、それぞれ受電電圧不平衡率を低くできることを示している。また横線部分は受電力率が負荷力率よりも遅れとなり力率改善にはならないため評価対象としない部分である。例えば、負荷力率が遅れ 0.9 の場合には、受電力率を遅れ 0.9 から進み 0.7 の範囲に調整すれば、相別力率調整法の方が電圧不平衡率を低くできる。需要家では電力料金割引を最大とするために受電力率を 1 に調整することが一般的である。これを図 5.12 上で見ると、受電力率が 1 の場合には、負荷力率に関係なく相別力率調整法が優位であることが分かる。また、負荷力率が低くなるほど、受電力率のより広い範囲において、相別力率

調整法の方が三相一括力率調整法よりも優位となることも分かる。

第 3 章において APFC の導入メリットとして、配電系統における電力損失の低減効果を定量的に評価した。需要家が SC を設置する本来の目的は力率調整であるが、APFC における SC 容量の選定方法に、従来の三相一括力率調整法のみでなく相別力率調整法も併用することで、力率改善用 SC を配電系統の電圧不平衡抑制に有効活用できるといえる。

5.4 結言

本章ではまず実測調査により高圧需要家における不平衡の実態を明らかにした。そして、SC を活用した電圧不平衡抑制の一手法として、従来の三相一括で SC 容量を調整する三相一括力率調整法に対して、相毎に SC 容量を調整する相別力率調整法を提案した。さらに、高圧需要家に両者を導入した場合の力率と電圧不平衡の関係をシミュレーションにより明らかにし、提案手法が電圧不平衡抑制に寄与することを示した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 高圧需要家 8 軒にて実測した負荷電流不平衡率を、内線規程に示された設備不平衡率と比較したところ、すべての需要家において負荷電流不平衡率の平均値が設備不平衡率の限度値 30% に相当する値を超えていると判断された。
- (2) 従来の三相一括力率調整法では、負荷が定インピーダンス特性の場合には受電力率が進みになるほど受電電圧不平衡率は大きくなった。この結果から、過剰な SC 容量の選定は配電系統の電圧不平衡を増加させる要因となりうることを確認できた。
- (3) 提案する相別力率調整法では、受電力率が 1 の場合に電圧不平衡率は最小となり、受電力率が 1 近い範囲では三相一括力率調整法よりも電圧不平衡率を低くできることが確認できた。よって、APFC の SC 容量調整法に適用すれば、SC を電圧不平衡抑制に活用できる。

本章では、SC の供給無効電力を連続的に調整できるものとして、三相一括力率調整法と相別力率調整法の評価を行った。現実的には無効電力調整に SC を用いる場合には複数バンクによる台数制御とすることが多いため、台数制御を想定した評価も必要である。そこで、第 6 章では SC の台数制御を想定し、配電系統全体の電圧不平衡を抑制する手法を提案する。

第 5 章 参考文献

- (1) 配電系統電力品質技術専門委員会：「配電系統における電力品質の現状と対応技術」, 電気協同研究, 第 60 巻, 第 2 号, pp.197-198 (2005)
- (2) 例えば, 中部電力株式会社ホームページ, <http://www.chuden.co.jp/>
- (3) 小西博雄：「電圧・電流の不均衡とその対策」, 電気設備学会誌, Vol.24, No.4, pp.271-274 (2004)
- (4) 林 泰弘, 松木 純也, 大橋 正芳, 多田 泰之：「单相負荷の接続替えによる三相電圧不平衡の改善支援手法」, 電学論 B, Vol.125, No.4, pp.365-372 (2005)
- (5) 内線規程専門部会：「内線規程 JEAC 8001-2005」, 日本電気協会, p.31 (2005)
- (6) 配電系統電力品質技術専門委員会：「配電系統における電力品質の現状と対応技術」, 電気協同研究, 第 60 巻, 第 2 号, p.34 (2005)
- (7) 配電系統電力品質技術専門委員会：「配電系統における電力品質の現状と対応技術」, 電気協同研究, 第 60 巻, 第 2 号, p.16 (2005)

第 6 章

進相コンデンサを活用した 協調的電圧不平衡抑制手法

6.1 緒言

配電システムの電力品質維持向上を目的に適正な進相コンデンサ（以下、SC とする）を普及させるため、SC を活用した新しい電力品質向上技術として電圧不平衡抑制に着目し、自動力率調整装置（以下、APFC とする）を活用した電圧不平衡手法を、第 5 章において検討した。

電圧不平衡抑制の現実的な対策としては、電圧不平衡による障害発生時に柱上変圧器等の単相負荷の接続替えが行われている程度であり、最適な接続替え箇所の決定手法が提案されている⁽¹⁾。しかしながら、配電システムの電圧不平衡を定常的に抑制するためには、高压需要家（以下、需要家とする）や住宅の負荷の不平衡が機器の稼働状態により変化することから、それに追従できる電圧不平衡抑制対策を配電システム側で実施することが望ましい。この点において SVC（Static Var Compensator）の設置は有効な対策であるが、コストが高く設置スペースも必要であるという課題がある。

一方高压需要家の SC は、契約電力で 500kW 程度以上の比較的規模が大きい需要家では SC を複数バンク構成とし、受電力率を目標値（通常は 1）に維持するように、APFC を用いて台数制御により SC 容量を調整している。しかしながら、規模が小さい需要家では APFC の導入が進んでおらず SC 容量が過剰である現状を考えると、配電システムと需要家を 1 つのシステムとして捉え、その電力品質維持向上を目的に配電システムの運用管理者と需要家または複数の需要家が協調的な関係の下で無効電力の適正化等の対策を行っていくことが、将来的な配電システムの運用形態の考え方として不可欠である。この協調的なシステム運用に関する研究も行われており⁽²⁾、他にも需要家設備を配電システム全体の電力品質維持のために積極的に活用し、それに対するインセンティブを設けるといった運用手法も考えられ、より効率

的な電力品質維持向上の実現の一助となると考えられる。

このような背景のもと、本章では第5章にて検討したSCの活用による電圧不平衡抑制に協調的運用の考え方を付加し、複数の高圧需要家のSCを協調的に動作させて配電系統全体の電圧不平衡を抑制する手法を提案する。各需要家のSC制御手法は、第5章では相別にAPFCを導入する手法を提案したが、本章では配電系統上の複数の高圧需要家に力率改善用SCとして単相SCを複数バンク導入し、各需要家受電点に生じる電圧不平衡を直接補償する相毎のSC台数制御を各需要家が協調的に行う。提案手法はSCを用いた台数制御で実現できることから実効性が高い対策であり、SVC等と比較して低コストで導入できるメリットがある。

本章では、まず提案手法の概要を述べ、次に計算機シミュレーションにより提案手法の有効性を検証した結果を示す。また、提案手法を配電系統上のどの需要家に導入するのがより効果的であるかという観点で、提案手法の実系統への導入手法について考察する。

6.2 電圧不平衡を抑制する進相コンデンサ制御手法

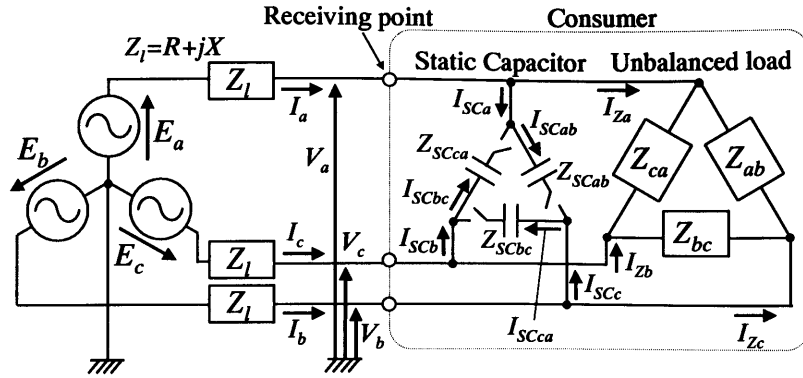
6.2.1 逆相電圧補償法

需要家のSCの一般的な制御手法は、受電力率が目標値となるように、複数バンク設置した三相SCをオン/オフする台数制御である（以下、従来法とする）。これに対し本章では、需要家に単相SCを複数バンク設置し、需要家受電点に生じる電圧不平衡から算出された逆相電圧を補償するように相毎に台数制御をする（以下、逆相電圧補償法とする）。

逆相電圧補償法を、図6.1に示した三相不平衡回路モデルを用いて説明する。図6.1は配電用変電所を電圧源とし、インピーダンスが三相平衡である配電線を介して定インピーダンス負荷と力率改善用SCを有した需要家が接続された状況を模擬している。ここで配電用変電所の電圧源 E_i ($i=a,b,c$)は時間によらず一定と仮定し、相電圧 \dot{V}_a を位相基準とする。

逆相電圧補償法の考え方は、SC投入前における需要家の受電電圧の不平衡成分（逆相電圧）を、投入するSC電流と配電用変電所から需要家までの配電線インピーダンスにより生じる電圧を利用して、相毎に補償するというものである。

図6.1の回路において、SC投入前の受電電圧 \dot{V}_a とSC投入後の受電電圧 \dot{V}_a^* の差分がSC電流 \dot{I}_{SCa} と配電線インピーダンス $R+jX$ により生じる電圧となる。これを(6.1)(6.2)(6.3)式にて定義される正相分 \dot{V}_1^* 、 \dot{V}_1 、 \dot{I}_{SC1} と逆相分 \dot{V}_2^* 、 \dot{V}_2 、 \dot{I}_{SC2} を用いて表現すると⁽³⁾、(6.4)式が成り立つ。



- $\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$: 電源電圧
- $Z_l (=R+jX)$: 配電線インピーダンス
- $\dot{V}_a, \dot{V}_b, \dot{V}_c$: SC 投入前の需要家受電電圧 (相電圧)
- $\dot{V}_a^*, \dot{V}_b^*, \dot{V}_c^*$: SC 投入後の需要家受電電圧 (目標値)
- $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$: 需要家受電電流
- $\dot{I}_{Za}, \dot{I}_{Zb}, \dot{I}_{Zc}$: 負荷電流
- $\dot{I}_{SCa}, \dot{I}_{SCb}, \dot{I}_{SCc}$: SC 電流
- $\dot{Z}_{ab}, \dot{Z}_{cb}, \dot{Z}_{ac}$: 負荷インピーダンス
- $\dot{Z}_{SCab}, \dot{Z}_{SCcb}, \dot{Z}_{SCac}$: SC インピーダンス

図 6.1 三相不平衡回路モデル

Fig. 6.1 Three-phase imbalanced circuit model

$$\begin{pmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{V}_1^* \\ \dot{V}_2^* \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{V}_a^* \\ \dot{V}_b^* \\ \dot{V}_c^* \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_{SC1} \\ \dot{I}_{SC2} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_{SCa} \\ \dot{I}_{SCb} \\ \dot{I}_{SCc} \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{V}_1^* \\ \dot{V}_2^* \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \dot{I}_{SC1} \\ \dot{I}_{SC2} \end{pmatrix} (R + jX) \quad (6.4)$$

ここで, $a = \frac{-1 + j\sqrt{3}}{2}$

SC 投入後の受電電圧不平衡率をゼロとするには, (6.4)式において $\dot{V}_2^* = 0$ とした(6.5)式を解くことにより, SC 電流を決定すればよい。

$$\begin{pmatrix} \dot{V}_1^* \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \dot{I}_{SC1} \\ \dot{I}_{SC2} \end{pmatrix} (R + jX) \quad (6.5)$$

次に, SC 電流の正相分と逆相分を求める式を導出する。各線間に流れる SC の電流 \dot{I}_{SCab} , \dot{I}_{SCbc} , \dot{I}_{SCca} は, 線間電圧 V_{ab}^* , V_{bc}^* , V_{ca}^* と SC のインピーダンスを用いて, 次の式で表される。

$$\begin{cases} \dot{I}_{SCab} = V_{ab}^* e^{j\frac{1}{6}\pi} / Z_{SCab} e^{-j\frac{1}{2}\pi} = I_{SCab} e^{j\frac{2}{3}\pi} \\ \dot{I}_{SCbc} = V_{bc}^* e^{-j\frac{1}{2}\pi} / Z_{SCbc} e^{-j\frac{1}{2}\pi} = I_{SCbc} e^{j0} \\ \dot{I}_{SCca} = V_{ca}^* e^{j\frac{5}{6}\pi} / Z_{SCca} e^{-j\frac{1}{2}\pi} = I_{SCca} e^{-j\frac{2}{3}\pi} \end{cases} \quad (6.6)$$

(6.6)式を線電流で表現すると, (6.7)式のようになる。

$$\begin{cases} \dot{I}_{SCa} = \dot{I}_{SCab} - \dot{I}_{SCca} = I_{SCab} e^{j\frac{2}{3}\pi} - I_{SCca} e^{-j\frac{2}{3}\pi} \\ \dot{I}_{SCb} = \dot{I}_{SCbc} - \dot{I}_{SCab} = I_{SCbc} - I_{SCab} e^{j\frac{2}{3}\pi} \\ \dot{I}_{SCc} = \dot{I}_{SCca} - \dot{I}_{SCbc} = I_{SCca} e^{-j\frac{2}{3}\pi} - I_{SCbc} \end{cases} \quad (6.7)$$

(6.7)式を用い, SC 電流の正相分及び逆相分を(6.3)式の定義にしたがって求めると, 次式のようになる。

$$\dot{I}_{SC1} = j \frac{1}{\sqrt{3}} (I_{SCab} + I_{SCbc} + I_{SCca}) \quad (6.8)$$

$$\dot{I}_{SC2} = \frac{1}{2} (I_{SCca} - I_{SCab}) + j \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{2} I_{SCab} - I_{SCbc} + \frac{1}{2} I_{SCca} \right) \quad (6.9)$$

本章では, 電圧不平衡の抑制を主目的とするため, 逆相分を表す(6.9)式に着目し, (6.9)式を(6.5)式に代入することで, 逆相分を補償する SC 電流を決定する方程式として次式を得る。

$$\begin{aligned}
-\dot{V}_2 = & -\frac{1}{2}R(I_{SCca} - I_{SCab}) + \frac{1}{\sqrt{3}}X\left(\frac{1}{2}I_{SCab} - I_{SCbc} + \frac{1}{2}I_{SCca}\right) \\
& + j\left(-\frac{1}{\sqrt{3}}R\left(\frac{1}{2}I_{SCab} - I_{SCbc} + \frac{1}{2}I_{SCca}\right) - \frac{1}{2}X(I_{SCca} - I_{SCab})\right)
\end{aligned} \quad (6.10)$$

次に、本来の SC 設置目的である力率改善に対する条件を導出する。なお本章で使用する力率は、電力料金の基本料金割引制度にて用いる力率と同様の定義とする。具体的には、力率 $\cos\theta$ は有効電力 P と無効電力 Q により、次式で計算される。

$$\cos\theta = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (6.11)$$

(6.11)式をもとに、需要家において力率改善に必要な SC 容量 Q_{PF} は次式で求めることができる。

$$Q_{PF} = P_{3\phi} \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta_{3\phi}} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta_{3\phi}^*} - 1} \right) \quad (6.12)$$

ここで、 $P_{3\phi}$: 需要家受電点の三相合計有効電力

$\cos\theta_{3\phi}$: 改善前(SC 投入前)の三相全体力率

$\cos\theta_{3\phi}^*$: 改善後(SC 投入後)の三相全体力率

力率改善は、各相の投入 SC 容量の合計が Q_{PF} と等しくなればよいことから、次式を得る。

$$V_{ab}^* I_{SCab} + V_{bc}^* I_{SCbc} + V_{ca}^* I_{SCca} = Q_{PF} \quad (6.13)$$

ここで V_{ab}^* 、 V_{bc}^* 、 V_{ca}^* は SC 投入後の受電電圧であるから三相平衡である。よって、すべて等しいとおくことにより(6.14)式を得る。

$$I_{SCab} + I_{SCbc} + I_{SCca} = Q_{PF} / V^* \quad (6.14)$$

ただし $V^* = V_{ab}^* = V_{bc}^* = V_{ca}^*$

(6.10)式と(6.14)式より次の三元連立方程式を得る。

$$\begin{pmatrix} Q_{PF}/V^* \\ \operatorname{Re}(-\dot{V}_2) \\ \operatorname{Im}(-\dot{V}_2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{2}R + \frac{1}{2\sqrt{3}}X & -\frac{1}{\sqrt{3}}X & -\frac{1}{2}R + \frac{1}{2\sqrt{3}}X \\ -\frac{1}{2\sqrt{3}}R + \frac{1}{2}X & \frac{1}{\sqrt{3}}R & -\frac{1}{2\sqrt{3}}R - \frac{1}{2}X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{SCab} \\ I_{SCbc} \\ I_{SCca} \end{pmatrix} \quad (6.15)$$

(6.15)式を解くと(6.16)式となり，SC 電流を求める式を得ることができる。

$$\begin{pmatrix} I_{SCab} \\ I_{SCbc} \\ I_{SCca} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{3} & \frac{\sqrt{3}R+X}{\sqrt{3}(R^2+X^2)} & \frac{-R+\sqrt{3}X}{\sqrt{3}(R^2+X^2)} \\ \frac{1}{3} & \frac{-2X}{\sqrt{3}(R^2+X^2)} & \frac{2R}{\sqrt{3}(R^2+X^2)} \\ \frac{1}{3} & \frac{-\sqrt{3}R+X}{\sqrt{3}(R^2+X^2)} & \frac{-R-\sqrt{3}X}{\sqrt{3}(R^2+X^2)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_{PF}/V^* \\ \text{Re}(-V_2) \\ \text{Im}(-V_2) \end{pmatrix} \quad (6.16)$$

各線間の投入 SC 容量 Q_{SCab} ， Q_{SCbc} ， Q_{SCca} は，(6.16)式で計算した SC 電流と受電電圧 V^* の積となり (6.17)式により求める。

$$\begin{cases} Q_{SCab} = V^* I_{SCab} \\ Q_{SCbc} = V^* I_{SCbc} \\ Q_{SCca} = V^* I_{SCca} \end{cases} \quad (6.17)$$

なお，(6.17)式により求める SC 容量は負の値となる場合がある。これは SC ではなくリアクトルを投入する必要があることを意味している。しかし，需要家に SC とリアクトルの両方を設置することは現実的ではない。そこでこの場合には，負となった相に既投入 SC があれば SC を開放し，SC がない場合には，各相投入容量の差を一定としたまま，負となった相の投入 SC 容量がゼロになるように合計投入容量を増加させる。これを式で表現すると，(6.17)式により求めた計算上の投入 SC 容量を Q_{SCab0} ， Q_{SCbc0} ， Q_{SCca0} とすると，いずれかの相の投入 SC 容量が負となった場合には， Q_{SCab} ， Q_{SCbc} ， Q_{SCca} は，(6.18)式により求める。

$$\begin{cases} Q_{SCab} = Q_{SCab0} - \min(Q_{SCab0}, Q_{SCbc0}, Q_{SCca0}) \\ Q_{SCbc} = Q_{SCbc0} - \min(Q_{SCab0}, Q_{SCbc0}, Q_{SCca0}) \\ Q_{SCca} = Q_{SCca0} - \min(Q_{SCab0}, Q_{SCbc0}, Q_{SCca0}) \end{cases} \quad (6.18)$$

この操作により I_{SCab} ， I_{SCbc} ， I_{SCca} は増加するが，力率改善の観点では(6.13)式において左辺の合計容量は Q_{PF} 以上となればよく，かつ (6.10)式は満足しているため不平衡抑制効果は維持されている。

実際に投入する SC 容量は，台数制御により離散値で調整することから，(6.17)式または(6.18)式により計算された SC 容量に最も近い容量となるように投入バンク数を求めることで決定する。

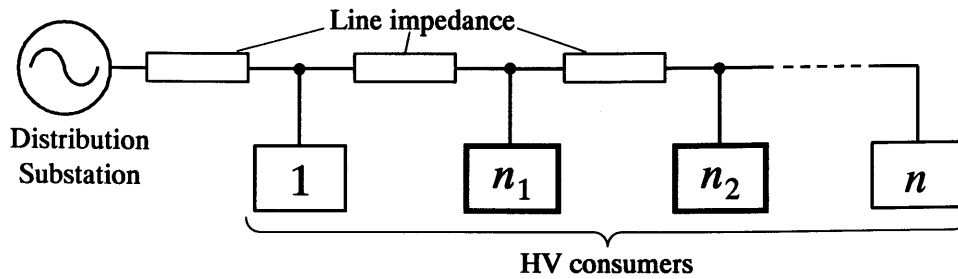


図 6.2 配電システムモデル

Fig. 6.2 Three-phase distribution system model

6.2.2 協調制御法

1つの配電システム上の複数の需要家に逆相電圧補償法を導入する場合には、ある需要家でのSCの投入や開放が他の需要家の受電電圧に影響を与えることから、複数の需要家間で協調的にSC容量を決定する必要がある。そこで本節では、以下のような協調制御法を提案する。

ここでは、図 6.2 の例題システムを用いて協調制御法を説明する。このシステムは、配電用変電所から1本のフィーダで n 軒の需要家に電力を供給している。なお、協調制御法は分岐があるフィーダにおいても適用可能である。ここでは各需要家に対して配電用変電所から近い順に番号を振ってある。このときフィーダ途中の需要家 n_1 と需要家 n_2 ($n_1 < n_2 < n$) のSCに逆相電圧補償法を導入する場合を考える。なお、逆相電圧補償法を導入した需要家間では、制御に必要な情報をリアルタイムに参照できるものとする。

まず、配電用変電所に近い需要家 n_1 において、自らの受電電圧の計測値と配電用変電所からのインピーダンス値を用いて、逆相電圧補償法により受電点の電圧不平衡を抑制するSC容量 Q_{n1} を算出する。次に需要家 n_2 では、需要家 n_1 が Q_{n1} のSCを投入した後の受電電圧値と、自端の受電電圧の計測値を用い、需要家 n_1 と自端の受電点の間で発生した電圧不平衡を抑制するように、逆相電圧補償法によりSC容量 Q_{n2} を算出する。ここで、需要家 n_1 と需要家 n_2 が、それぞれが算出したSCをすべて投入すると、需要家 n_1 の受電電圧は、需要家 n_2 が投入したSCに流れる無効電流の影響により、計算通りに電圧不平衡を抑制できなくなる。そこで需要家 n_1 では、需要家 n_2 が投入するSC容量 Q_{n2} を差し引いた容量 $Q_{n1} - Q_{n2}$ を投入する。このときSC容量 $Q_{n2} > Q_{n1}$ となる場合には、需要家 n_1 の投入SC容量が負の値になってしまうため、逆相電圧補償法と同様に当該相にはSCを投入せず、残りの相に当該相と同一容量のSCを追加投入する。このように需要家 n_1 と需要家 n_2 の間で投入するSC容量に関する情報を交換することで、複数の需要家に逆相電圧補償法を導入した場合でも、それらが協調して投入SC容量を調整することが可能となる。

6.3 シミュレーションによる検証

6.3.1 配電システムモデル

提案した逆相電圧補償法ならびに協調制御法（以下、提案法とする）を、配電システム上の需要家の SC 制御に適用した場合の有効性を、シミュレーションにより確認した。

なお、本章での電圧不平衡率の定義は、(6.19)式のように逆相電圧と正相電圧の比で定義される電圧不平衡率 V_K を用いた⁽⁴⁾。これは電力会社が電圧管理のために用いている定義である。また負荷の不平衡率の定義は、(6.20)式のように需要家設備の技術規程である内線規程における設備不平衡率と同様の考え方で定義した負荷不平衡率 P_K を用いた⁽⁵⁾。電圧と電流で異なる定義を用いたのは、実務上の分かりやすさのためである。提案手法では直接正相分と逆相分を求めて SC 容量を算出しているため、不平衡率の定義の違いはシミュレーションによる有効性検証には影響しない。

$$V_K = \frac{V_2}{V_1} \times 100[\%] \quad (6.19)$$

ここで、 V_1 ：正相電圧 V_2 ：逆相電圧

$$P_K = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{ave}} \times 100[\%] \quad (6.20)$$

ここで、 P_{max} ：各線間有効電力の最大値

P_{min} ：各線間有効電力の最小値

P_{ave} ：各線間有効電力の平均値

シミュレーションは、図 6.2 の配電システムモデルを用い、表 6.1 に示した条件により行った。フィーダの総こう長は 4km とし、8 軒の需要家が等間隔で接続されているものとした。各需要家の有効電力と負荷不平衡率は、それぞれ 150~450kW、30~70%の範囲でランダムに設定した。

このシミュレーションモデルを用い、以下の 2 つのケースを比較することにより、提案法の有効性を確認した。

- ①ケース 1：全ての需要家の SC に目標力率を 1 とした従来法を導入する。
- ②ケース 2：フィーダ中間の需要家（需要家 4）およびフィーダ末端の需要家（需要家 8）の SC に提案法を導入する。他の需要家の SC には目標力率を 1 とした従来法を導入する。

表 6.1 シミュレーション条件

Table 6.1 Conditions of simulation

配電用変電所	
電源インピーダンス	$j0.389 \Omega$
配電線インピーダンス	$0.149 + j0.381 \Omega / \text{km}$
配電線こう長	4 km (各需要家間 : 0.5km)
電圧不平衡率	0 % (各線間 : 6600 V)
	0.5 % (ab 間 : 6628 V)
	(bc 間 : 6572 V)
	(ca 間 : 6600 V)
各高圧需要家	
有効電力	150~450 kW
負荷力率	0.9 (Lag)
負荷不平衡率	30~70 %
SCバンク容量	50 kvar/1 バンク

表 6.2 各需要家の負荷条件

Table 6.2 Conditions of loads

需要家 No.		合計	1	2	3	4	5	6	7	8
負荷有効電力 [kW]	ab	626	42	67	83	64	120	45	81	124
	bc	811	68	42	131	87	172	76	63	171
	ca	706	54	64	128	56	111	81	57	154
合計有効電力 [kW]		2143	165	174	342	207	403	202	201	448
負荷不平衡率 [%]		26	48	44	43	45	46	54	35	32

表 6.3 各需要家の SC 容量と受電力率

Table 6.3 Conditions of SC capacity and power factor at receiving point

需要家 No.		合計	1	2	3	4	5	6	7	8	
ケース1	SC容量[kvar]	1200	100	100	200	150	200	100	100	250	
	力率(進み)	1.000	0.993	0.996	0.996	0.976	1.000	1.000	1.000	0.999	
ケース2 $V_K=0\%$	SC 容量 [kvar]	ab	1250	100	100	200	0	200	100	100	50
		bc					100				50
		ca					150				100
	力率(進み)	1.000	0.993	0.996	0.996	0.820	1.000	1.000	1.000	0.999	
ケース2 $V_K=0.5\%$	SC 容量 [kvar]	ab	1600	100	100	200	0	200	100	100	50
		bc					300				50
		ca					300				100
	力率(進み)	0.981	0.992	0.996	0.995	0.383	1.000	1.000	1.000	0.999	

6.3.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果の一例として、負荷電力と負荷不平衡率をランダムに設定した表 6.2 の条件において、上位系統に電圧不平衡がない場合の各需要家の SC 容量と受電力率の計算結果を表 6.3 に示す。また各需要家受電点の各線間電圧を図 6.3 に、電圧不平衡率を図 6.4 にそれぞれ示す。

図 6.3 と表 6.2 を見ると、ケース 1 では各線間で最も負荷電力が小さい ab 間の電圧が他の相よりも高い電圧となり、電圧不平衡を発生させている。これに対しケース 2 では、ab 間

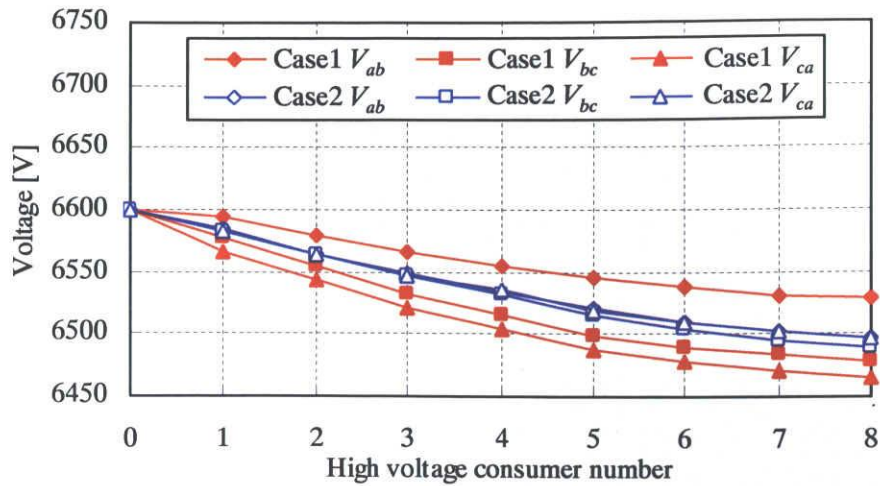


図 6.3 上位系統に電圧不平衡がない場合の各線間電圧

Fig. 6.3 Line voltage without imbalance of voltage on distribution substation

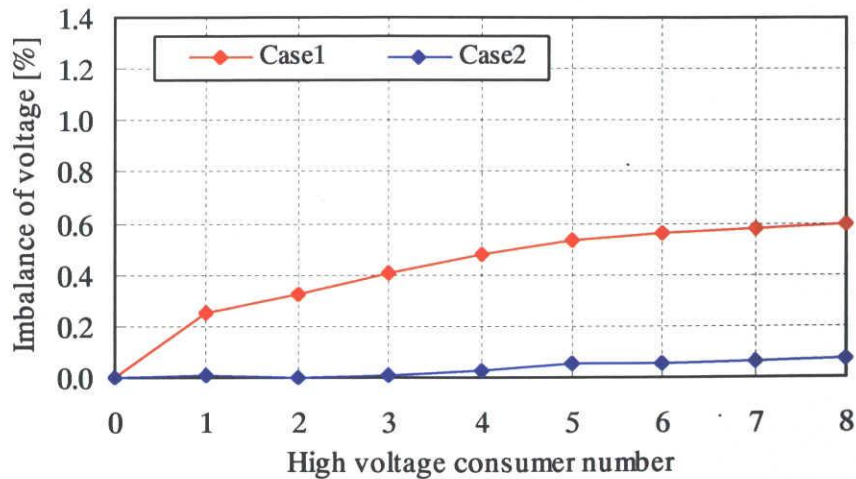


図 6.4 上位系統に電圧不平衡がない場合の電圧不平衡率

Fig. 6.4 Imbalance of voltage without imbalance of voltage on distribution substation

以外の相に ab 相よりも大きい容量の SC を投入し電圧を上昇させることで電圧不平衡の抑制を図るように SC 容量が選定される。その結果，図 6.4 から分かるように，ケース 1 では配電用変電所より遠くなるほど電圧不平衡率が大きくなり，末端では 0.6% 程度となっているのに対して，ケース 2 では系統上のすべての点において，電圧不平衡率は 0.1% 未満に抑制できている。

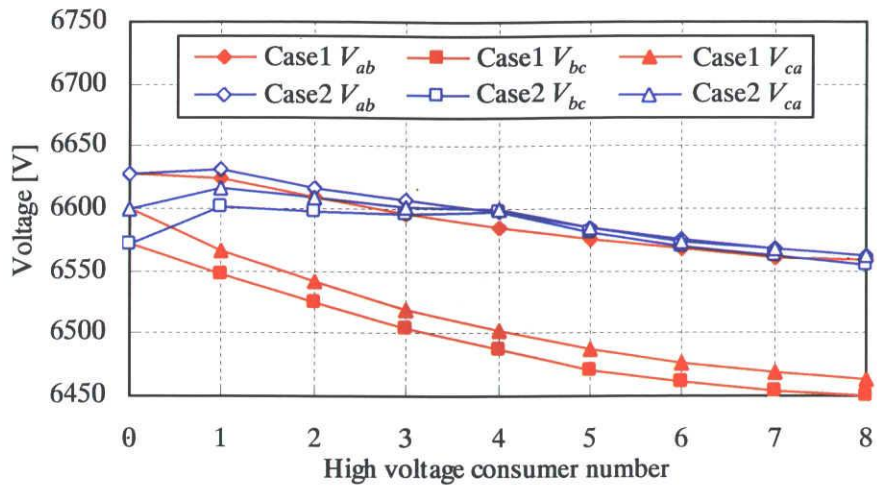


図 6.5 上位系統に電圧不平衡がある場合の各線間電圧

Fig. 6.5 Line voltage with imbalance of voltage on distribution substation

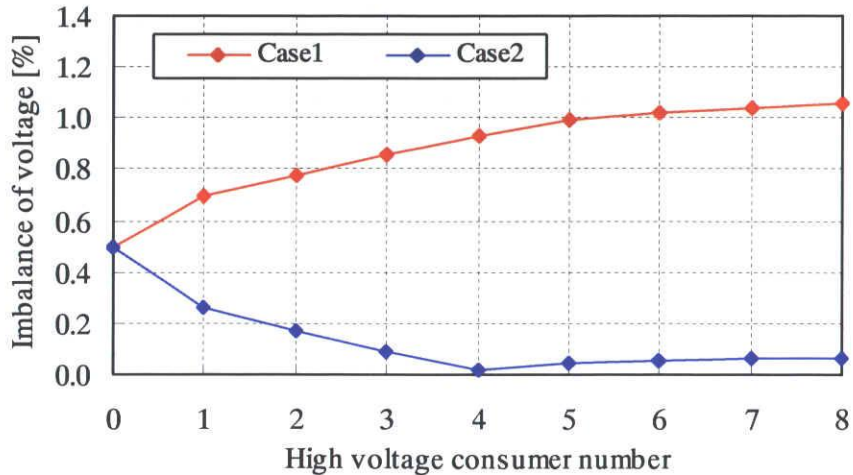


図 6.6 上位系統に電圧不平衡がある場合の電圧不平衡率

Fig. 6.6 Imbalance of voltage with imbalance of voltage on distribution substation

次に、上位系統に 0.5% の電圧不平衡を想定した計算結果を図 6.5 と図 6.6 に示す。図 6.5 と表 6.3 から分かるように、配電用変電所において最も電圧が高い ab 間以外の相に、上位系統に電圧不平衡がない場合よりもさらに大きい容量の SC を投入することで、電圧不平衡の抑制を図っている。その結果、図 6.6 から分かるように、ケース 1 では末端では電圧不平衡率が 1.0% を超えているのに対して、ケース 2 では配電用変電所から提案手法を導入した

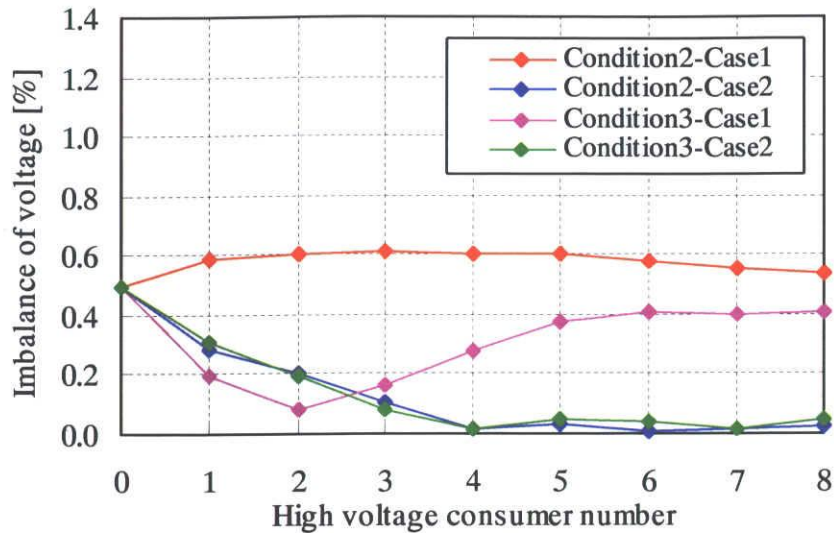


図 6.7 異なる負荷条件における電圧不平衡率計算例

Fig. 6.7 Imbalance of voltage on the other condition of loads

需要家 4 までの点では電圧不平衡率は直線的に減少し、需要家 4 と需要家 8 の間も 0.1% 未満に抑制できている。本シミュレーションでは SC バンク容量を 50kvar としたが、需要家 4 から配電用変電所を見たインピーダンスが 1Ω 程度であるため、各線間での 50kvar 単位の SC 容量調整は、概算 7V 程度(=50/6.6×1)の電圧調整に相当する。そのため図 6.4 や図 6.6 のように 0.1% 程度までの電圧不平衡抑制が可能となる。

表 6.2 の負荷条件以外の計算結果例として、上位系統に 0.5% の電圧不平衡を想定し負荷条件をランダムに設定し計算した結果のうち、傾向が異なる 2 例を図 6.7 に示す。条件 2 はケース 1 の電圧不平衡率が送り出しと末端でおおむね一定である場合、条件 3 は需要家負荷の不平衡により、当該需要家近傍の電圧不平衡率が配電用変電所よりも低減されている場合である。これらの条件においても、ケース 2 では提案法を設置した需要家 4 から系統末端側の需要家では、電圧不平衡率が 0.1% 以下に抑制されていることが分かる。

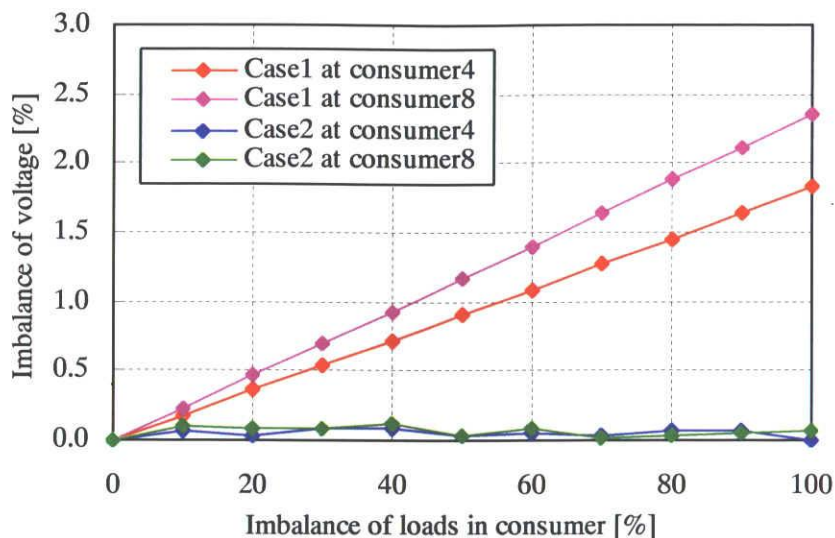


図 6.8 需要家の負荷不平衡率と系統の電圧不平衡率

Fig. 6.8 Relation between imbalance of voltage and imbalance of loads in consumer

6.3.3 負荷の不平衡が変化した場合の効果

前項のシミュレーションでは、需要家の負荷不平衡率をランダムに与えたが、負荷の不平衡がさらに大きくなった場合を想定したシミュレーションを行った。具体的には、各需要家の負荷不平衡率をすべて同じ値とし、さらに配電系統全体での負荷不平衡率を最大にするため、各需要家の最大電力、最小電力の相がすべて一致するように負荷条件を設定した。

その結果として、系統の中間点である需要家 4 及び系統の末端である需要家 8 の電圧不平衡率を図 6.8 に示す。図 6.8 から分かるように、ケース 1 では負荷不平衡率が大きくなるに従って、電圧不平衡率も直線的に増加する。これに対してケース 2 では、負荷不平衡率が大きくなっても電圧不平衡率を 0.1%以下に抑制できている。よって、単相負荷の極端な増加といった負荷不平衡の増大に対しても、提案法は有効である。

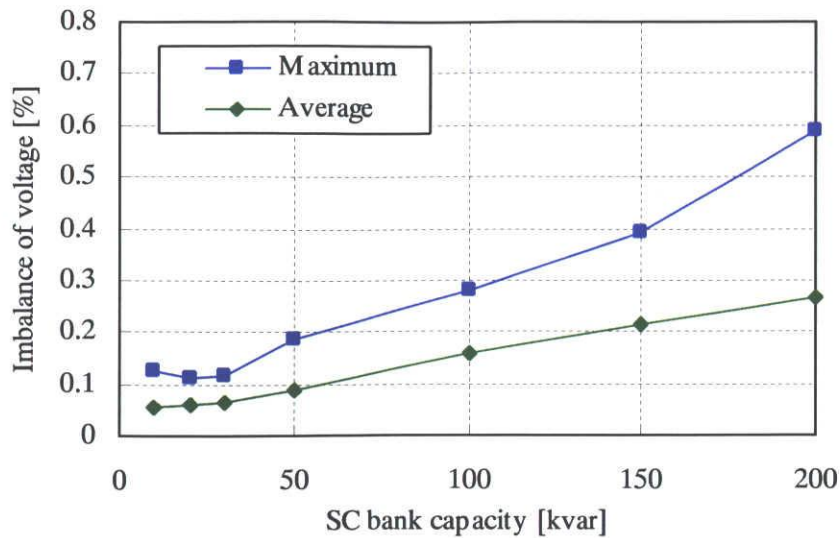


図 6.9 SCバンク容量と電圧不平衡率

Fig. 6.9 Relation between SC bank capacity and imbalance of voltage

6.3.4 進相コンデンサバンク容量の影響

逆相電圧補償法では、導入対象需要家の受電電圧の逆相成分をゼロとするように回路方程式を解くことでSC容量を決定する。このため、SVCのように供給する無効電力を連続的に変化させることができる設備を導入すれば、基本的には電圧不平衡率をほぼゼロにできる。しかし、本章では、比較的安価に導入できるSCの台数制御の活用を想定している。台数制御の場合にはSC容量を段階的にしか変化させることができないため、実系統に適用した場合にどの程度まで電圧不平衡を抑制できるかは、台数制御するSCバンク容量に依存すると考えられる。図 6.3 から図 6.8 に示したシミュレーション結果では、SCバンク容量を50kvarと設定していたが、SCバンク容量を変化させたときの電圧不平衡抑制効果を確認した。具体的には、ケース 2 の条件において、各需要家の負荷電力、負荷不平衡率、および相毎の負荷不平衡の与え方をすべてランダムに設定し、系統各点の電圧不平衡率を計算した。このシミュレーションを、SCバンク容量を10~200kvarの範囲で変えて100回ずつ実施し、系統点の電圧不平衡率の最大値と平均値を求めた結果を図 6.9 に示す。この結果より、SCバンク容量が50kvar以下であれば、電圧不平衡率最大値は0.2%未満に抑制できており、100kvarの場合でも0.3%程度であることが分かる。よって実系統への適用の際には、SCバンク容量は50~100kvar程度とすればよいと考える。

6.4 提案法の効果的な導入箇所の考察

6.4.1 考察内容

6.3 節のシミュレーションでは、提案法をフィーダの中間付近と末端の需要家に導入した場合を想定して、電圧不平衡抑制効果を検証した。実際の配電システムへの適用を考えると、どの需要家に提案法を導入するのが効果的であるかをあらかじめ知っておくことが望ましい。そこで提案法の効果的な導入位置について考察する。ここで効果的な導入とは、①電圧不平衡率、②配電損失、③設置 SC 容量、のそれぞれが小さくなることを意味する。

具体的には、8 軒の需要家に対してある組み合わせで提案法を導入した場合において、表 6.1 のシミュレーション条件をもとに負荷電力と負荷不平衡をランダムに設定した計算を 100 回行い、前述の 3 項目の最大値をそれぞれ求めた。このようなシミュレーションを、提案法を導入する需要家の組み合わせを変えて実施し比較することで、効果的な導入箇所を考察した。なお、実システムへの適用を考えると、協調制御ロジックの単純化や協調制御に必要な情報通信インフラの整備等コスト面の観点から、提案法を導入する需要家数はなるべく少ないほうが望ましいと考えられる。そこで本章では提案法を導入する需要家を最大 3 軒とした。以下に 3 項目の評価結果を示す。

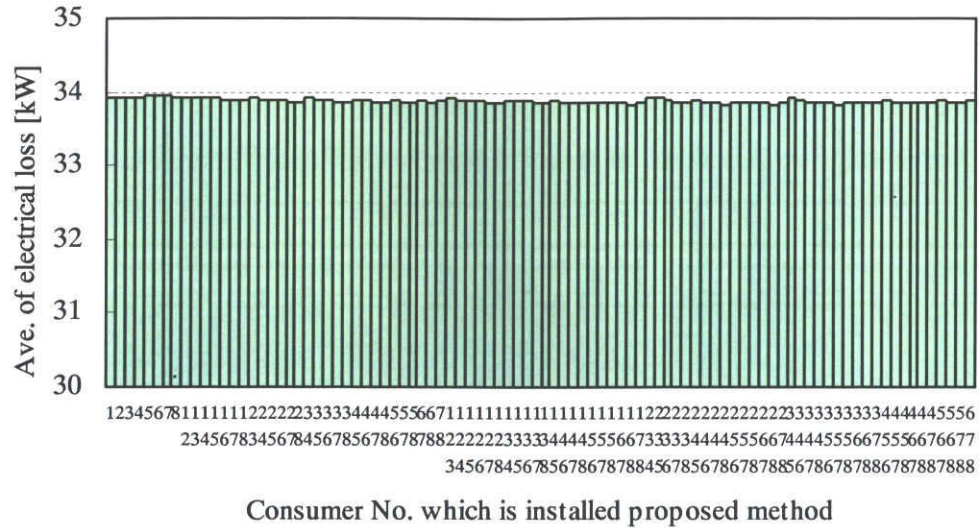


図 6.11 提案法導入パターンと配電損失

Fig. 6.11 Relation between install pattern of proposed method and electrical loss of distribution line

6.4.3 配電損失

提案法の導入パターン毎の配電損失を図 6.11 に示す。シミュレーションにおいて負荷電力をランダムに設定しているため、配電損失は 100 回の計算の平均値を示した。いずれの導入パターンにおいても配電損失は 34kW 程度であり、導入パターンによる差はほとんど見られない。一般的な需要家では、受電力率を 1 より進み側に維持するように SC を台数制御することが多い。従って、結果的に系統全体の SC 容量が大きめに投入されることとなり、系統力率が 1 の場合よりも配電損失が大きくなる可能性がある。よって、配電損失低減の観点では、従来法を導入している需要家において SC を過剰に投入しないことが望ましい。

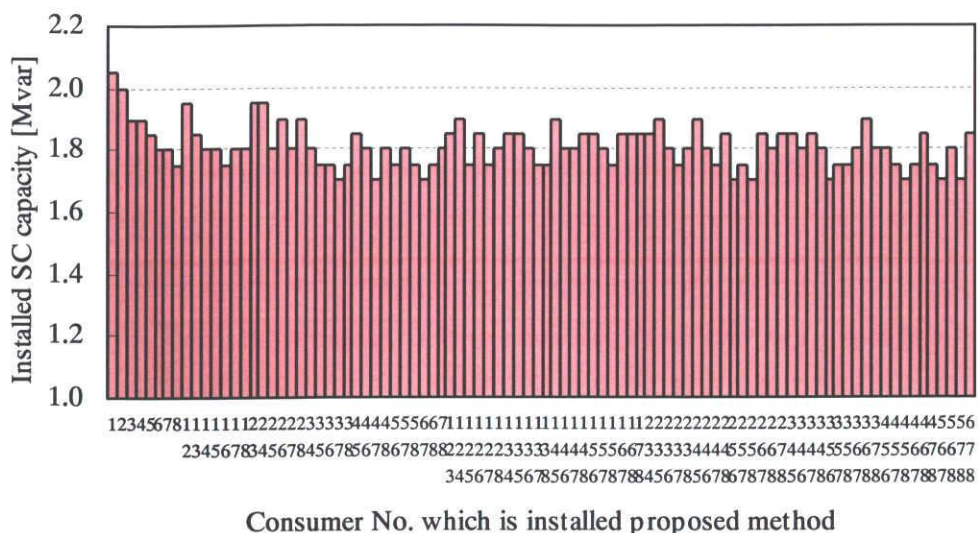


図 6.12 提案法導入パターンと設置 SC 容量

Fig. 6.12 Relation between install pattern of proposed method and installed SC capacity

6.4.4 設置容量

提案法の導入パターン毎の設置 SC 容量を図 6.12 に示す。設置 SC 容量は、100 回の計算における系統全体の投入 SC 容量の最大値とした。設置 SC 容量は 1.7~2.0Mvar 程度であり、1 軒または 2 軒への導入の場合には、導入箇所が末端にある場合に設置容量が小さくなる傾向があることが分かる。これは末端ほど配電線インピーダンスが高いことから、配電用変電所の近くと比較して小容量の SC で電圧を調整できるためと考えられる。提案法の導入箇所数を多くすると、情報通信インフラの整備や導入需要家との調整がより多く必要となる。よって、本章で想定したような配電システムモデルの場合には、6.3 節で示したケースのように配電系統の中間付近と末端付近の 2 軒に提案法を導入することが望ましいといえる。実系統への導入に際しては、系統構成がさらに複雑となることから、各評価項目を総合的に加味して導入箇所を決定する必要がある。

6.5 結言

本章では、将来的な配電システムの運用形態を想定し、複数の高圧需要家の SC を協調的に動作させて配電システム全体の電圧不平衡を抑制する手法を提案した。具体的には、配電システム上の複数の高圧需要家に力率改善用 SC として単相 SC を複数バンク導入し、各需要家受電点に生じる電圧不平衡を直接補償するように相毎の SC 台数を制御する逆相電圧補償法と、各需要家の SC が逆相電圧補償法を協調的に行うための協調制御法を提案した。また、提案手法を配電システム上のどの需要家に導入するのがより効果的であるかという観点で、提案手法の実システムへの導入手法について考察した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 配電用変電所上位側に電圧不平衡がない場合では、従来の APFC の導入のみではシステム末端の電圧不平衡率が 0.6%であったが、提案法の導入により配電システム上のすべての点において電圧不平衡率を 0.1%未満に抑制できた。
- (2) 配電用変電所上位側に 0.5%の電圧不平衡を想定した場合には、従来の APFC の導入のみではシステム末端の電圧不平衡率が 1.0%を超えていたが、提案法の導入によりシステム末端の電圧不平衡率を 0.1%未満に抑制できた。
- (3) 需要家の負荷不平衡率さらに増大させた場合には、従来の APFC の導入のみではシステムの電圧不平衡率も直線的に増加するが、提案法では電圧不平衡率を 0.1%以下に抑制でき、極端な不平衡の増大に対しても提案法は有効であった。
- (4) 提案法を需要家に導入する場合の SC バンク容量を検討し、50~100kvar 程度であれば電圧不平衡を 0.3%程度以下に抑制できた。
- (5) 提案法の効率的な配電システム上への導入箇所を検討し、配電システムの中間付近と末端付近への導入が望ましいことを確認した。

本章では、提案法の有効性を 1 フィーダの配電システムモデルにより効果を検証した。実システムを想定すると、複数フィーダで分岐がある場合、分散型電源により配電システムに逆潮流が発生した場合等に対する効果検証が必要である。さらに、電圧不平衡の時間的変動を考慮した導入需要家間の制御タイミングの決定方法や、SC 用開閉器寿命を考慮した制御回数の低減方法、及び需要家への提案法導入に必要なコストインセンティブ等の制度面が課題である。また、提案法は、電圧不平衡抑制のみならず供給電圧調整、SC バンクに直列リアクトルが設置されていることを利用した高調波電圧抑制にも活用できると考える。このような、多様な用途に用いた場合の統合的な協調制御手法について検討していく必要がある。

第6章 参考文献

- (1) 林 泰弘, 松木 純也, 大橋 正芳, 多田 泰之:「単相負荷の接続替えによる三相電圧不平衡の改善支援手法」, 電学論B, Vol.125, No.4, pp.365-372 (2005)
- (2) 林 泰弘, 川崎 章司, 松木 純也, 若尾 真治, 馬場 旬平, 北條 昌秀, 横山 明彦, 小林 直樹, 平井 崇夫, 生石 光平:「分散型電源の導入拡大に対応した配電系統の協調運用形態」, 電学論B, Vol. 127, No. 1, pp.41-51 (2007)
- (3) 新田目倅造:「電力系統技術計算の基礎」, 電気書院, p.237 (1994)
- (4) 配電系統電力品質技術専門委員会:「配電系統における電力品質の現状と対応技術」, 電気協同研究, 第60巻, 第2号, p.16 (2005)
- (5) 内線規程専門部会:「内線規程 JEAC 8001-2005」, 日本電気協会, p.31 (2005)

第7章

結論

7.1 本研究で得られた成果

本研究では、配電システムにおける電力品質に関する障害の中でも、近年問題となっている電圧上昇の多くが、高圧需要家の進相コンデンサ（以下、SCとする）に起因していることに着目し、SCの適正な容量選定手法の提案、SCへの自動力率調整装置（以下、APFCとする）の導入メリットの定量評価、SCを活用した配電システムの電圧不平衡抑制手法を提案した。第2章にて、SC容量や電力品質の実態を実測調査により把握したうえでSCの適正な容量選定手法を提案した。第3章と第4章では、SCへの自動力率調整装置（以下、APFCとする）の導入による配電システムの電圧上昇抑制効果と高調波電圧抑制効果を定量評価するための評価モデルを提案するとともに、シミュレーションによりAPFC導入効果を定量的に示した。第5章にて、APFCの制御手法が配電システムの電圧不平衡に与える影響を明確にしたうえで、第6章にてSCを活用し配電システムと需要家が協調した電圧不平衡抑制手法を提案した。以上、これらの研究成果をまとめると以下の通りである。

第1章では、配電システムにおける電力品質の課題を整理するとともに、電力品質に影響を与える高圧需要家のSCの設計手法と現状の課題を述べた。そのうえで、配電システムの電力品質を向上するため、高圧需要家の過剰なSCの抑制とSCへのAPFCや直列リアクタルの積極的導入の必要性を示し、本研究の意義と目的を明確にした。

第2章では、高圧需要家における過剰なSCの実態を実測調査により明らかにした。現在、一部の配電システムで発生している電圧上昇が、高圧需要家の過剰なSCに起因するといわれていることを踏まえ、様々な種類の高圧需要家における実測調査を実施し、得られたデータを用いて高圧需要家における受電点や使用される負荷機器の力率の実態を明らかにすることによって、SCが過剰となる傾向にあることを示した。そして、過剰なSCが設置される

のを防ぐ対策として、実測結果に基づいた適正な SC 容量の選定手法を提案した。さらに、提案手法を用いた場合の配電系統の電圧上昇抑制効果と配電損失低減効果を定量的に評価し、提案手法の有効性を検証した。得られた結果を再掲すると以下のとおりである。

- (1) APFC がいない需要家では、受電平均力率の平均値が夏季で進み 0.74、中間季で進み 0.61 であり、過剰な容量の SC が常時投入されている。
- (2) 負荷平均力率の平均値は遅れ 0.91 であった。また、変圧器毎の負荷平均力率は、三相変圧器では遅れ 0.90、単相変圧器では遅れ 0.97 であり、これらはいずれも「3分の1ルール」の前提である負荷力率遅れ 0.80 に比べてよくなっている。
- (3) APFC がいない需要家において、最小 SC 容量の考え方で設備設計時の SC 容量選定法の見直しの必要性を検討したところ、17軒中 16軒で見直しが必要となった。
- (4) 三相変圧器と単相変圧器を区別した SC 容量選定法を提案し、今回の実測結果を基にして具体的な選定式を導出した。
- (5) 提案した SC 容量選定法の有効性をシミュレーションにより評価し、配電系統の電圧上昇を規定範囲内に抑制できることと、電力損失を 50%以下に低減できること確認した。

第 3 章では、高圧需要家の SC への APFC に導入による電圧上昇抑制効果に着目した。SC 設置容量が適正であっても全容量が常時投入されていると、軽負荷時において需要家の受電力率が過度な進みとなる。そのため APFC の導入促進に向けた具体的な方策の検討へ繋げることを目的とし、実態に合った高圧需要家及び配電系統の評価モデルを提案し、それを用いて高圧需要家の SC に対して APFC を導入した場合の、配電系統の電圧上昇の抑制や配電損失の低減などの効果を定量的に明らかにした。得られた結果を再掲すると以下のとおりである。

- (1) 実測結果から、大部分の高圧需要家の負荷全体の有効電力と無効電力の関係は直線的であった。そしてその結果から、高圧需要家を 1つの負荷と SC で表現し、実態に合った力率を設定できる評価モデルを提案した。
- (2) 平均的な配電系統において、すべての高圧需要家に APFC を導入した場合には、電圧上昇が 200V 程度から 50V 程度に抑制できる。
- (3) APFC の導入による配電損失の削減分は、145MWh/年となり、これは供給電力量の 2.0% に相当する。

第 4 章では、高圧需要家の SC への APFC 導入による高調波電圧抑制効果に着目した。ま

ず実測調査により高圧需要家における高調波の実態を把握した。そのうえで、得られた実測データを用いて高圧需要家の高調波発生パターンのモデル化を行った。そしてそのモデルを用いたシミュレーションにより、APFCを導入した場合の配電系統の高調波電圧低減効果を定量的に明らかにした。得られた結果を再掲すると以下のとおりである。

- (1) 高圧需要家から流出する第5調波および第7調波電流は、実測した8軒のうち6軒においてガイドラインの上限値を超過していた。
- (2) 実測した8軒の高圧需要家における負荷機器全体の有効電力と高調波流出電流の関係は、正の相関、ステップ関数、一定の3通りに集約できた。そこでこの結果を用い、高調波発生源を有する高圧需要家の簡易モデルとして、上記の特性を有する高調波電流源用いたモデルを提案し、高圧需要家のSCへのAPFC導入による配電系統の高調波抑制効果をシミュレーションにより定量評価した。
- (3) 配電用変電所一次側に第5調波電圧がない場合には、APFC導入率を現状の約2倍(20%から45%)に増やすと、第5調波電圧を約75%に抑制できる。同様に配電用変電所一次側に1%の第5調波電圧がある場合には、第5調波電圧を約70%に抑制できる。
- (4) APFC導入率が0から20%に増加すると、第5調波電圧を最大値で55%、平均値で60%に抑制でき、導入前のAPFC導入率が低いほうが単位APFC導入あたりの抑制率が大きい。したがって、現状のAPFC導入率が低い配電系統に対して優先的に導入を進めることが、より効率的な高調波電圧抑制に結びつく。
- (5) 夜間の軽負荷時に直列リアクトル付SCを投入したままにしておくと、配電用変電所一次側に1%の第5調波電圧がある場合には、配電系統末端の第5調波電圧はAPFCにて直列リアクトル付SCを開放した場合に対して約75%に低減できる。したがって、APFCの制御手法として配電系統全体の力率が過剰な進みとならない程度に投入する直列リアクトル付SC容量を系統全体で調整することで、高調波電圧をさらに低減できる可能性がある。

第5章では、SCを活用した新しい電力品質向上技術として電圧不平衡抑制手法を検討した。まず実測調査により高圧需要家における不平衡の実態を明らかにした。そして、SCを活用した電圧不平衡抑制の一手法として、従来の三相一括でSC容量を調整する三相一括力率調整法に対して、相毎にSC容量を調整する相別力率調整法を提案した。さらに、高圧需要家に両者を導入した場合の力率と電圧不平衡の関係をシミュレーションにより明らかにし、提案手法が電圧不平衡抑制に寄与することを示した。得られた結果は以下のとおりで

ある。

- (1) 高圧需要家 8 軒にて実測した負荷電流不平衡率を、内線規程に示された設備不平衡率と比較したところ、すべての需要家において負荷電流不平衡率の平均値が設備不平衡率の限度値 30%に相当する値を超えていると判断された。
- (2) 従来の三相一括力率調整法では、負荷が定インピーダンス特性の場合には受電力率が進みになるほど受電電圧不平衡率は大きくなった。この結果から、過剰な SC 容量の選定は配電系統の電圧不平衡を増加させる要因となりうることを確認できた。
- (3) 提案する相別力率調整法では、受電力率が 1 の場合に電圧不平衡率は最小となり、受電力率が 1 近い範囲では三相一括力率調整法よりも電圧不平衡率を低くできることが確認できた。よって、APFC の SC 容量調整法に適用すれば、SC を電圧不平衡抑制に活用できる。

第 6 章では、将来的な配電システムの運用形態を想定し、第 5 章にて検討した SC の活用による電圧不平衡抑制に協調的運用の考え方を付加し、複数の高圧需要家の SC を協調的に動作させて配電系統全体の電圧不平衡を抑制する手法を提案した。具体的には、配電系統上の複数の高圧需要家に力率改善用 SC として単相 SC を複数バンク導入し、各需要家受電点に生じる電圧不平衡を直接補償するように相毎の SC 台数を制御する逆相電圧補償法と、各需要家の SC が逆相電圧補償法を協調的に行うための協調制御法を提案した。また、提案手法を配電系統上のどの需要家に導入するのがより効果的であるかという観点で、提案手法の実系統への導入手法について考察した。得られた結果を再掲すると以下のとおりである。

- (1) 配電用変電所上位側に電圧不平衡がない場合では、従来の APFC の導入のみでは系統末端の電圧不平衡率が 0.6%であったが、提案法の導入により配電系統上のすべての点において電圧不平衡率を 0.1%未満に抑制できた。
- (2) 配電用変電所上位側に 0.5%の電圧不平衡を想定した場合には、従来の APFC の導入のみでは系統末端の電圧不平衡率が 1.0%を超えていたが、提案法の導入により系統末端の電圧不平衡率を 0.1%未満に抑制できた。
- (3) 需要家の負荷不平衡率さらに増大させた場合には、従来の APFC の導入のみでは系統の電圧不平衡率も直線的に増加するが、提案法では電圧不平衡率を 0.1%以下に抑制でき、極端な不平衡の増大に対しても提案法は有効であった。

- (4) 提案法を需要家に導入する場合の SC バンク容量を検討し、50~100kvar 程度であれば電圧不平衡を 0.3%程度以下に抑制できた。
- (5) 提案法の効率的な配電系統上への導入箇所を検討し、配電系統の中間付近と末端付近への導入が望ましいことを確認した。

7.2 今後の課題と将来展望

本研究では、配電システムにおける電力品質に多大な影響を与える高圧需要家の SC に着目し、SC を活用した電力品質改善手法の提案ならびに評価を行った。

第 2 章では、高圧需要家における過剰な SC の実態を実測調査により明らかにしたが、高圧需要家ならびに電気設備設計・施工者が広く認識できるよう、さらなる継続的な実測調査が必要と考える。データ収集と分析の積み重ねにより配電システムの電力品質問題を関係者の共通認識とし、関係者が協力して電力品質向上方策を検討していく必要がある。また、第 2 章にて提案した SC 容量選定手法では、設備設計の実務で活用していくために高圧需要家内で使用される負荷機器の力率データの継続的な収集とデータベース化が不可欠である。現状の設備設計では設備竣工後の実稼働データの収集とその設計へのフィードバックが十分であるとはいえない。したがって、本論文で着目した力率問題に限らず、消費電力、稼働時間、故障履歴等の広い範囲での実稼働データを継続的に収集し分析することが、より適正な設備設計手法の確立に寄与するものと考ええる。

第 3 章と第 4 章では、高圧需要家の SC への APFC 導入による配電系統の電力品質向上効果を、提案した簡易な評価モデルによるシミュレーションにより定量的に評価したが、配電系統運用実務での技術計算に簡易評価モデルを活用していくためのツール化が必要である。また評価モデルの精度向上の観点では、さらなる実測データの充実も必要である。

また、第 4 章では APFC 導入効果の定量化のため、高調波発生源を有する高圧需要家の簡易評価モデルを提案したが、今後は住宅への太陽光発電や燃料電池等の分散型電源の導入促進により、単相電力需要の変化とインバータ機器の増加による高調波電流の増加が懸念される。そのため、住宅における電力使用ならびに高調波発生の実態把握と、そのモデル化が必要となる。さらに第 4 章と第 5 章で明らかにした高圧需要家における高調波と不平衡の実態についてもさらなる継続的な実測調査が必要である。

第 6 章で提案した SC を活用した配電系統の電圧不平衡抑制手法では、実系統への適用を想定し複数フィーダで分岐がある場合での効果検証が必要である。また、今後普及が進む分散型電源によって配電系統に逆潮流が発生した場合における効果検証も必要である。ま

た SC 容量をリアルタイムで制御することを想定し、電圧不平衡の時間的変動を考慮した導入需要家間の制御タイミングの決定方法や、SC 用開閉器寿命を考慮した制御回数の低減方法を検討する必要がある。また、提案法は SC バンクに直列リアクトルが設置されていることを利用した高調波電圧抑制にも活用できると考えられ、電力品質の多様な項目に対する適用手法を検討していく。

現実的には、高圧需要家が APFC を導入するには、自身に対してなんらかのメリットがある必要があり、それには高圧需要家構内の電力品質改善とコストインセンティブの 2 種類が考えられる。電力品質改善については、SC の低圧側設置の普及促進が望ましいと考えられ、そのためには第 3 章や第 4 章で示した配電システムへのメリット評価とともに、高圧需要家内での電力損失や高調波電流の低減効果等を定量評価し、高圧需要家が享受できるメリットを明確にしていく必要がある。コストインセンティブに関しては、具体的には現行の力率割引制度に変わる電力料金体系を検討するべきである。従来の発電、送電、配電を一体として所有、運営する電力会社では、電力システムの運用に不可欠な無効電力供給を電力料金に含めて回収するという考え方が基本である。しかしながら、電力自由化の進展により発電、送電、配電、販売等の各部門が独立性を強めてくると、送配電部門では電力システム運用のためのアンシラリーサービスの重要性が増してくる。よって、重要なサービス項目の 1 つである無効電力調整においても、その価値を定量評価し適正なコストを設定する必要がある。高圧需要家の SC に対してもこのような考え方を導入することによって、需要家に受け入れられ適正な SC 設備の設置、運用に寄与するような制度設計を行うことが必要である。

今後、電力自由化の進展と自然エネルギーの積極的な導入による分散型電源の増加に伴って、配電システムの電力品質向上の重要性がさらに増してくると考えられる。そのため、配電システムとそれに接続される需要家群を 1 つのシステムと捉え、システム構成要素となる電気事業者と需要家は電力品質向上の目的のもとでより協調して設備形成や設備運用を行う必要がある。第 6 章で提案した電圧不平衡抑制手法では、電気事業者は SC の制御に必要な配電システムインピーダンスや配電用変電所の電圧実測値などの情報を需要家に公開し、需要家はそれらの情報に基づき SC を制御するという協調を行っている。また、電気事業者との契約に基づき配電システム側から需要家設備を遠隔制御するという手法も考えられる。このような手法を電力品質全般の維持に活用するとともに、配電システム全体での既存設備の最大活用や設備投資の最小化による効率的な電力品質向上を目的とした協調的運用が必要となる。さらにはリスクマネジメントの観点では、電力品質が悪化した場合には電気事業

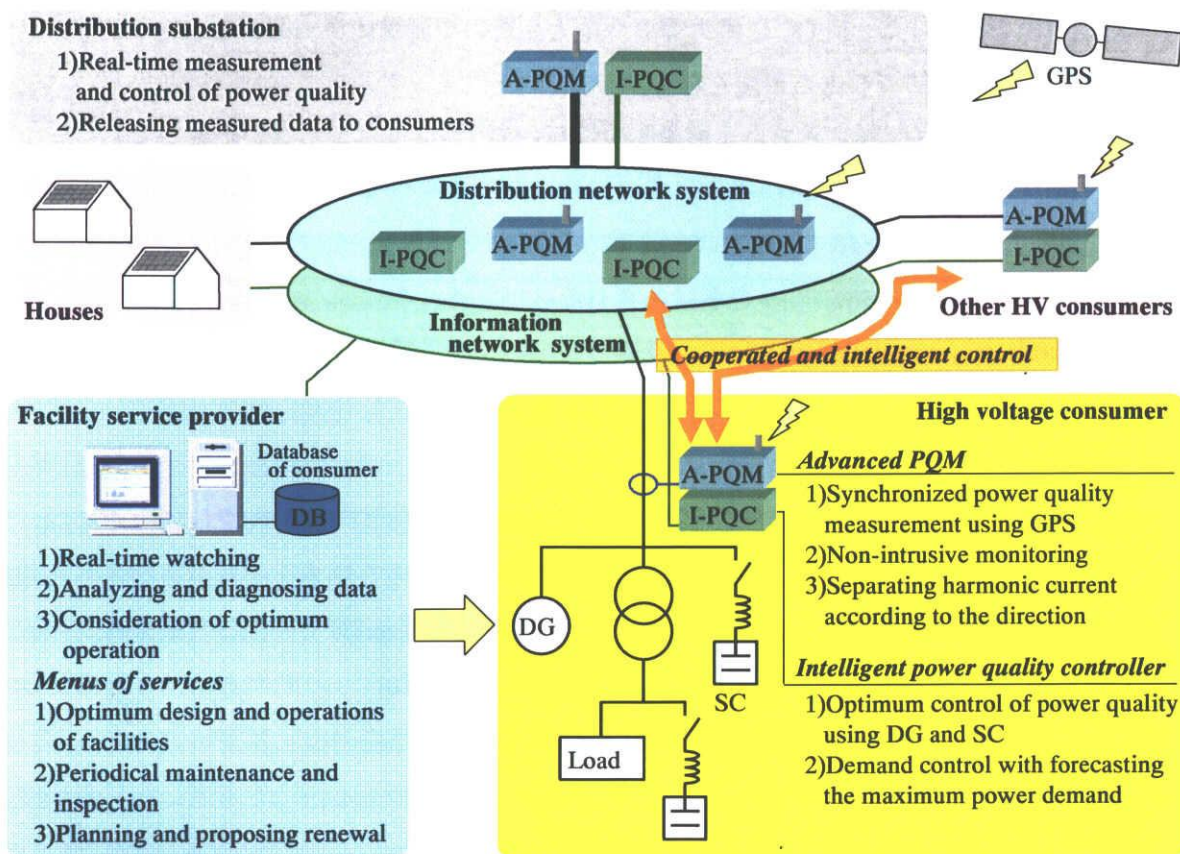


図 7.1 将来の配電システム構想

Fig.7.1 Conceptual diagram of Future distribution system

者により SC や分散型電源などの需要家設備を一時的に集中制御したり、災害等での停電時には分散型電源を最大限活用できるように分散型電源近傍の SC を自律分散的に制御するような手法も考えられる。

図 7.1 に将来の配電システム構想を示す。前述のような多様な制御機能を電力品質コントローラ (Intelligent power quality controller : I-PQC) に実装して配電用変電所、配電フィーダ、高圧需要家等の配電システム各所に配置する。制御に必要な電圧、電流等の電力品質に関するデータは、要所に配置した高性能計測ユニット (Advanced power quality measurement unit : A-PQM) により GPS 等を用いて多地点同期計測し、情報通信ネットワークを介して送受信する。A-PQM は非侵入による下位データの推定機能や高調波電流の方向別分離等の高付加価値機能も有している。電気事業者は配電システムのリアルタイム計測データを情報通信ネットワークにて公開する。各 I-PQC は必要な A-PQM のデータを手し、配電システム

の電力品質維持を目的にフィーダ途中や隣接需要家の I-PQC と協調して制御対象の SC や分散型電源を制御する。I-PQC に電力需要や電力品質の予測機能を実装することで、電力品質の悪化を未然に防ぐことも可能となる。

図 7.1 のような配電システムを構築するには、専門的な電気技術者が不足している中小規模の高圧需要家に対しては、エネルギー供給に関するすべてのサービスを提供する事業者 (Facility service provider : FSP) が必要である。これは従来の ESP (Energy service provider) のようにエネルギー供給のみを事業とするだけでなく、中立的な立場として配電システム全体の電力品質向上も目的として、設備のリアルタイム監視、稼働データ分析や診断、最適な運用手法の検討を行う。そして需要家に対しては適正な設備の設計と運用、定期的な保全管理、中長期的な設備改修計画の提案等を行う。

このような手法で将来にわたって配電システムの電力品質向上を実現していくには、システムの計画、設計、施工、運用等に関わる関係者のすべてにメリットがあるスキームを確立することも必要である。その観点では、第 2 章から第 4 章で評価した配電システムの電力品質向上効果は、配電システムを運用する電力会社に直接的なメリットがある。需要家側から見れば、受電電圧の安定化や高調波電圧の低減は電源信頼度向上に繋がるのであるが、現状はこれらの電力品質は電力料金に反映されていないため、これらを考慮した料金制度の検討は不可欠である。さらに SC を低圧側設置とすれば変圧器損失や配線損失低減という直接的なメリットも享受できるため、それらの評価も定量的に行っておく必要がある。また直列リアクトルや APFC 導入が進めば、これらの製品を供給するメーカーや設計施工する、工事関係者にもメリットが出てくる。さらには、個々の配電システムにおいて電力品質向上や効率化が実現されれば、大きな視点で見れば我が国の電力システム全体の効率化にも結びつき、地球環境問題の視点では CO₂ に代表される環境負荷削減にも寄与するため、行政関係者にとってもメリットが出てくる。このように需要家、電力会社、設計施工者、メーカー、行政関係者の五者すべてがメリットを享受できるような仕組み作りを目指していくことが重要である。

謝辞

本研究の遂行，論文作成にあたり，終始熱心にご指導ご鞭撻を賜りました名古屋工業大学大学院工学研究科教授 鵜飼裕之先生に心より謝意を表し，御礼申し上げます。

本研究の遂行，論文作成にあたり，貴重なご意見，ご助言を頂戴致しました名古屋工業大学大学院工学研究科教授 竹下隆晴先生，同教授 水野幸男先生，名古屋大学大学院工学研究科教授 松村年郎先生に深く感謝致します。

本研究の遂行にあたり，日頃からの確なご意見を頂きました名古屋工業大学大学院工学研究科助教 青木睦先生に深く感謝致します。

本研究の遂行にあたり，貴重なご意見を頂きました中部大学教授 中村光一先生，中部電力(株) 梶川拓也氏，同社 山田琢寛氏，同社 坂井洋志氏，同社 松岡寛樹氏，(財)中部電気保安協会 原英喜氏，同協会 梅村正人氏に深く感謝致します。また，実測データを提供して頂きました(社)電気設備学会 相河永也氏をはじめ同学会中部支部委託調査研究委員会の関係各位に深く感謝致します。

また，本研究における実測データの分析や計算機シミュレーションの実施にあたり，絶大なるご協力を頂きました博士前期課程 内藤寛氏（現，(株)NTT ファシリティーズ），博士前期課程 山田昌平氏（現，中部電力(株)），博士前期課程 丸山将司氏（現，(株)東芝），博士前期課程 大井宏氏に，深く感謝致します。

本研究は名古屋工業大学電力システム研究室（鵜飼研究室）で行われたものであり，さまざまなお助言を頂きました博士後期課程（中部電力(株)）中地芳紀氏，日夜苦勞を共にした鵜飼研究室の皆様，日頃の生活においてお世話になりました秘書の八幡まゆみ氏に感謝致します。

大学院博士後期課程進学に格段のご配慮くださいました(株)トーエネック技術開発室 上原正和 前室長，近藤俊作 室長，研究開発グループ 伊藤公一グループ長をはじめ(株)トーエネック関係各位に厚く御礼申し上げます。

2009 年
小林 浩

研究業績

学会誌掲載論文

- (1) 小林 浩, 青木 睦, 内藤 寛, 鶴飼裕之, 原 英喜, 坂井洋志, 梶川拓也, 中村光一 : “実測に基づく高圧需要家における適正進相コンデンサ容量の選定”, 電気設備学会誌, Vol.27, No.6, pp.464-471 (2007) (第2章に対応)
- (2) 小林 浩, 青木 睦, 鶴飼裕之, 原 英喜, 坂井洋志, 梶川拓也, 中村光一 : “高圧需要家への自動力率調整装置導入が配電系統へ与える効果の定量評価”, 電気設備学会誌, Vol.28, No.2, pp.153-159 (2008) (第3章に対応)
- (3) 小林 浩, 山田昌平, 青木 睦, 鶴飼裕之, 梅村正人, 坂井洋志, 梶川拓也, 中村光一 : “高圧需要家における力率改善手法が配電系統の電圧不平衡に与える影響”, 電気設備学会誌, (掲載決定) (第5章に対応)
- (4) 小林 浩, 山田昌平, 青木 睦, 鶴飼裕之 : “力率改善用進相コンデンサを活用した配電系統の電圧不平衡抑制手法”, 電気学会論文誌 B, 129 巻 1 号, (2009) (掲載決定) (第6章に対応)

国際学会発表論文 (査読あり)

- (1) Hiroshi Kobayashi, Mutsumi Aoki, Hiroyuki Ukai, Hiroshi Sakai, Takuya Kajikawa, Hideki Hara and Koichi Nakamura : “Effect on Power Quality in Distribution System by Introduction of Automatic Power Factor Controller in High Voltage Consumers”, Proceedings of International Conference on Electrical Engineering (ICEE), ICEE689 (2007).
- (2) Mutsumi Aoki, Hiroshi Kobayashi, Hiroyuki Ukai, Hiroshi Sakai and Takuya Kajikawa : “Improvement of Power Factor and Harmonics by Static Capacitors in Distribution System”, Proceedings of International Conference on Electrical Engineering (ICEE), ICEE690 (2007).
- (3) Hiroshi Kobayashi, Masashi Maruyama, Mutsumi Aoki and Hiroyuki Ukai, : “Improvement of Harmonic Voltage in Distribution System by Introducing Automatic Power Factor Controller in High Voltage Consumers”, Proceedings of International Conference on Electrical Engineering (ICEE), No.O-180 (2008).

国内学会発表論文

- (1) 原 英喜, 小林 浩, 内藤 寛, 山田琢寛, 柴山直幹, 中村光一：“高圧受電設備に取り付けられる進相コンデンサ容量の実態調査”, 平成 16 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.19-20, 関西学院大学 (2004).
- (2) 小林 浩, 内藤 寛, 山田琢寛, 原 英喜, 柴山直幹, 中村光一：“高圧受電設備における力率の計測と分析”, 平成 16 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.21-22, 関西学院大学 (2004).
- (3) 内藤寛, 山田琢寛, 原 英喜, 小林 浩, 柴山直幹, 中村光一：“高圧受電設備における最適な進相コンデンサ容量の検討”, 平成 16 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.23-24, 関西学院大学 (2004).
- (4) 山田琢寛, 柴山直幹, 原 英喜, 小林 浩, 内藤寛, 中村光一：“高圧受電設備の進相コンデンサが配電系統電圧に与える影響”, 平成 16 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.25-26, 関西学院大学 (2004).
- (5) 内藤 寛, 青木睦, 中村光一, 原 英喜, 小林 浩, 山田琢寛：“実測に基づく高圧需要家の受電端電圧頻度分布の分析”, 平成 17 年度電気学会電力・エネルギー部門大会予稿 CD-ROM, No.220, 大阪大学 (2005).
- (6) 原 英喜, 小林 浩, 山田琢寛, 太田宗則, 内藤 寛, 青木 睦, 中村光一：“高圧受電設備における自動力率調整装置の実態調査”, 平成 17 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.11-12, 東北学院大学 (2005).
- (7) 内藤 寛, 青木 睦, 中村光一, 山田琢寛, 太田宗則, 小林 浩, 原 英喜：“高圧受電設備における力率の測定と進相コンデンサ容量の検討”, 平成 17 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.13-14, 東北学院大学 (2005).
- (8) 小林 浩, 原 英喜, 山田琢寛, 太田宗則, 内藤 寛, 青木 睦, 中村光一：“実測結果を踏まえた高圧受電設備及び配電系統の簡易モデルの検討”, 平成 17 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.15-16, 東北学院大学 (2005).
- (9) 山田琢寛, 太田宗則, 小林 浩, 原 英喜, 内藤 寛, 青木 睦, 中村光一：“高圧受電設備の進相コンデンサが配電系統に与える影響評価”, 平成 17 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.17-18, 東北学院大学 (2005).
- (10) 小林 浩, 原 英喜, 山田琢寛, 太田宗則, 内藤 寛, 青木 睦, 中村光一：“高圧受電設備における削減可能な進相コンデンサ容量の検討”, 平成 17 年度電気関係学会東海支部連合大会予稿 CD-ROM, No.O-182, 名城大学 (2005).
- (11) 内藤 寛, 青木 睦, 中村光一, 山田琢寛, 太田宗則, 原 英喜, 小林 浩：“配電系

- 統における力率が電圧不平衡に与える影響の基礎検討”,平成 17 年度電気関係学会東海支部連合大会予稿 CD-ROM, No.O-184, 名城大学 (2005).
- (12) 山田昌平, 青木 睦, 鵜飼裕之, 小林 浩, 原 英喜, 坂井洋志, 梶川拓也, 中村光一: “コンデンサが配電系統・需要家へ与える影響評価に関する研究 (第 1 報) - 力率の計算方法に関する基礎検討”,平成 18 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.53-54, 北海道工業大学 (2006).
- (13) 原 英喜, 小林 浩, 山田昌平, 青木 睦, 鵜飼裕之, 坂井洋志, 梶川拓也, 中村光一: “コンデンサが配電系統・需要家へ与える影響評価に関する研究 (第 2 報) - 高压需要家における変圧器および主要負荷の力率測定と分析”,平成 18 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.55-56, 北海道工業大学 (2006).
- (14) 小林 浩, 山田昌平, 青木 睦, 鵜飼裕之, 原 英喜, 坂井洋志, 梶川拓也, 中村光一: “コンデンサが配電系統・需要家へ与える影響評価に関する研究 (第 3 報) - 実測結果を踏まえた高压需要家の電力損失評価モデルの構築”,平成 18 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.57-58, 北海道工業大学 (2006).
- (15) 坂井洋志, 梶川拓也, 小林 浩, 原 英喜, 山田昌平, 青木 睦, 中村光一: “コンデンサが配電系統・需要家へ与える影響評価に関する研究 (第 4 報) - 高压需要家における進相コンデンサの設置メリットの定量評価”,平成 18 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.59-60, 北海道工業大学 (2006).
- (16) 小林 浩, 青木 睦, 鵜飼裕之, 原 英喜: “ワールドカップ期間中の配電系統高調波: 電圧測定結果”,平成 18 年度電気関係学会東海支部連合大会予稿 CD-ROM, No.○, 岐阜大学 (2006).
- (17) 山田昌平, 青木 睦, 鵜飼裕之, 小林 浩, 原 英喜, 坂井 洋志, 梶川 拓也, 中村 光一: “進相コンデンサによる電圧不平衡への影響評価”,平成 18 年度電気学会全国大会予稿 CD-ROM, No.6-088, 富山大学 (2007).
- (18) 大井 宏, 青木 睦, 小林 浩, 鵜飼裕之: “家電機器からの高調波発生量と配電線の高調波電圧の関係”,平成 18 年度電気学会全国大会予稿 CD-ROM, No.6-103, 富山大学 (2007).
- (19) 小林 浩, 青木 睦, 鵜飼裕之: “配電系統の高調波電圧が高压需要家の高調波流出電流に与える影響”,平成 18 年度電気学会全国大会予稿 CD-ROM, No.6-104, 富山大学 (2007).
- (20) 丸山将司, 青木 睦, 鵜飼裕之, 小林 浩, 原 英喜, 坂井 洋志, 梶川 拓也, 中村 光一: “高調波を含む配電系統簡易等価回路の検討”,平成 18 年度電気学会全国大会予稿

- CD-ROM, No.6-105, 富山大学 (2007).
- (21) 山田昌平, 青木 睦, 鷺飼裕之, 小林 浩, 梅村正人, 坂井洋志, 梶川拓也, 中村光一: “進相コンデンサが高調波等に与える影響評価に関する研究 (第 1 報) - 実測に基づく高圧需要家における電流の不均衡の解析 -”, 平成 19 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.241-242, 広島工業大学 (2006).
- (22) 丸山将司, 青木 睦, 鷺飼裕之, 小林 浩, 梅村正人, 坂井洋志, 梶川拓也, 中村光一: “進相コンデンサが高調波等に与える影響評価に関する研究 (第 2 報) - 高調波・不均衡を考慮した配電系統等価回路の導出 -”, 平成 19 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.243-244, 広島工業大学 (2006).
- (23) 小林 浩, 丸山将司, 青木 睦, 梅村正人, 坂井洋志, 梶川拓也, 中村光一: “進相コンデンサが高調波等に与える影響評価に関する研究 (第 3 報) - 実測に基づく高圧需要家における高調波流出電流の分析 -”, 平成 19 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.245-246, 広島工業大学 (2006).
- (24) 坂井洋志, 梶川拓也, 小林 浩, 丸山将司, 青木 睦, 梅村正人, 中村光一: “進相コンデンサが高調波等に与える影響評価に関する研究 (第 4 報) - 配電系統の電力品質を考慮した適正なコンデンサ設備の検討 -”, 平成 19 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.247-248, 広島工業大学 (2006).
- (25) 山田昌平, 小林 浩, 青木 睦, 鷺飼裕之: “高圧需要家の電流不均衡を抑制する進相コンデンサ制御手法”, 平成 19 年度電気関係学会東海支部連合大会予稿 CD-ROM, No.O-020, 信州大学 (2007).
- (26) 小林 浩, 丸山将司, 青木 睦, 鷺飼裕之: “高圧需要家における高調波流出電流評価手法に関する研究 (第 1 報) ~ 配電系統の高調波電圧を考慮した高調波流出電流評価 ~”, 平成 19 年度電気関係学会東海支部連合大会予稿 CD-ROM, No.O-018, 信州大学 (2007).
- (27) 丸山将司, 小林 浩, 青木 睦, 鷺飼裕之: “高圧需要家における高調波流出電流評価手法に関する研究 (第 2 報) ~ 実測データを用いた高調波流出電流評価指標の検討 ~”, 平成 19 年度電気関係学会東海支部連合大会予稿 CD-ROM, No.O-019, 信州大学 (2007).
- (28) 大井 宏, 小林 浩, 青木 睦, 鷺飼裕之, 梅村正人, 松岡寛樹, 梶川拓也, 中村光一: “オール電化住宅における高調波の実態調査”, 平成 19 年度電気学会全国大会予稿 CD-ROM, No.6-027, 福岡工業大学 (2008).
- (29) 丸山将司, 小林 浩, 青木 睦, 鷺飼裕之: “配電系統の高調波電圧抑制のための高圧需要家における対策設備導入指標の検討”, 平成 19 年度電気学会全国大会予稿 CD-ROM,

- No.6-026, 福岡工業大学 (2008).
- (30) 山田昌平, 小林 浩, 青木 睦, 鵜飼裕之: “配電線の電圧不平衡を抑制する進相コンデンサ協調制御手法”, 平成 19 年度電気学会全国大会予稿 CD-ROM, No.6-141, 福岡工業大学 (2008).
- (31) 大井 宏, 青木 睦, 鵜飼裕之, 小林 浩, 梅村正人, 松岡寛樹, 梶川拓也, 中村光一: “電力使用形態の変化が電力品質へ与える影響に関する調査研究 (第 1 報) - オール電化住宅の高調波の実測結果 -”, 平成 20 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.373-374, 愛媛大学 (2008).
- (32) 小林 浩, 大井 宏, 青木 睦, 鵜飼裕之, 梅村正人, 松岡寛樹, 梶川拓也, 中村光一: “電力使用形態の変化が電力品質へ与える影響に関する調査研究 (第 2 報) - 実測に基づくオール電化住宅の高調波発生モデルの構築 -”, 平成 20 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.375-376, 愛媛大学 (2008).
- (33) 松岡寛樹, 梶川拓也, 小林 浩, 梅村正人, 大井 宏, 青木 睦, 中村光一: “電力使用形態の変化が電力品質へ与える影響に関する調査研究 (第 3 報) - オール電化住宅の影響を考慮した配電系統の高調波電圧の検討 -”, 平成 20 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.377-378, 愛媛大学 (2008).
- (34) 成瀬太一, 青木 睦, 大井 宏, 小林 浩, 鵜飼裕之: “実測データによる家電機器の高調波電流の重畳係数”, 平成 20 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.379-380, 愛媛大学 (2008).
- (35) 青木 睦, 成瀬太一, 小林 浩, 大井 宏, 鵜飼裕之: “シミュレーションによる家電機器の高調波電流重畳係数の解析”, 平成 20 年度電気設備学会全国大会予稿集, pp.381-382, 愛媛大学 (2008).
- (36) 小林 浩, 山田昌平, 青木 睦, 鵜飼裕之: “力率改善用進相コンデンサを活用した配電系統の電圧不平衡抑制手法”, 平成 20 年度電気学会電力・エネルギー部門大会予稿 CD-ROM, No.25, 広島大学 (2008).
- (37) 楊 京京, 小林 浩, 青木 睦, 鵜飼裕之: “進相コンデンサの低圧設置における配線損失低減効果の考察”, 平成 20 年度電気関係学会東海支部連合大会予稿 CD-ROM, No.O-283, 愛知県立大学 (2008).