

# 発電機無効電力出力制限を考慮した 系統電圧崩壊の時系列解析

## Time Series Analysis of System Voltage Collapse Viewed from Reactive Power Supply Restrictions in Generators

後藤 泰之                      一柳 勝宏  
Yasuyuki GOTO                Katsuhiko ICHIYANAGI

**Abstract** In recent years, the voltage stability which is caused by the increase of voltage independent type of load and the insufficient of reactive power supply at long-distance transmission lines has been watched.

In this paper, I build a model system which assumed bulk power systems and analyze the time transition of power systems voltage with the P-V characteristics on the load bus. Then I run after the process that leads to voltage collapse by the transition of operating point of bus voltage on the P-V curves. Especially, I take notice of the reactive power supply restrictions in generators and investigate that the restrictions have an effect on the system voltage on the P-V curves. As a result, the model system led to voltage collapse caused by reactive power in generators get to the restriction in the severe case of load increase and line trip. In order to avoid the voltage collapse, I indicated that SC individual control and preset SC are effective.

### 1. まえがき

近年の電力系統においては電力設備の立地問題や環境問題のため、電源が偏在すると同時に遠隔化し、送電線は長距離大容量化する傾向にある。他方、負荷構成に目を向けると質的には定電力特性を持つ負荷の割合が増え、地域的に電源から遠隔の需要が大きく成長してきている例が多くなっている。このような情勢下では従来あまり問題視されなかった受電電圧の大きさそのものについての電圧安定性が問題となってきている。現在、この電圧安定性に対しては、潮流方程式に基づく多根解析<sup>1) 2)</sup>やその評価指

標<sup>3) 4)</sup>に関する検討が行われている。さらに系統電圧の時間的推移に対しても数学的手法やシミュレーション解析<sup>5) 6)</sup>などが行われている。しかしながら従来の解析は理論的な側面に重きがおかれており、対象とする系統は比較的小規模のものが多く、現実に近い規模の系統を対象として検討したものは少ない。

本論文では、わが国の大都市周辺系統の典型的な特徴を考慮にいれて、6発電所20母線からなる放射状モデル系統を構築し、系統擾乱発生後の系統電圧の時間的変化を、負荷端のP-V特性に注目して連続的な静的解析を行っている。ここでは系統状態（変圧器タップの動作等）の時間的推移にともなうP-V曲線の移動を追跡し、母線電圧崩壊に至る機

構を明らかにしている。特に、発電機の無効電力出力制限が負荷端のP-V曲線に与える影響の著しいことを指摘している。さらに、擾乱発生後の電圧崩壊を回避し、系統電圧を安定に維持するための対策として、調相用コンデンサ(以下SCと略記)の個別フィードバック制御の効果を検討している。系統擾乱としては、昼休み中の需要の極小値からの急激な負荷増加、あるいは、その期間中に系統内のいずれかの2回線区間における1回線脱落を想定し、系統が電圧崩壊に至る過程をシミュレーションにより解析している。

## 2. モデル系統

### 2・1 モデル系統の構成

本論文では、わが国における大都市をめぐる放射状電力系統を模擬したモデル系統を構築し、そのモデル系統において電圧安定性の解析を行なうこととした。モデル系統の構成および負荷分布を図1に示す。線路定数については文献7)参照。本モデル系統は6機20母線から成り立っており、電源群が負荷に対して若干の偏在を生じている配置となっている。中央の太線は500kV基幹送電線を示し、これから各発電所に向けて電源線が分岐している。主要な負荷はこの基幹送電線上の各母線から供給される。基幹送電線から遠隔地にある負荷の増加に対処するため、延長された500kV長距離送電線が7A-6Aである。同図

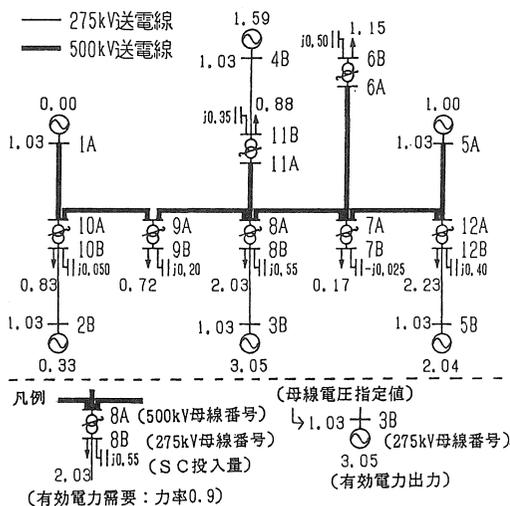


図1 放射状モデル系統(負荷増加開始時)

において、変電所の500kV母線には母線番号に「A」、275kV母線には「B」を添えて示している。なお、母線1Aは隣接する大規模電力系統との連系点を想定している。図中の数値は、次節に想定する負荷増加開始時点における発電電力および需要電力の差を500kV、1000MVAをベースとする単位法で示している。各負荷母線における矢印は需要とその母線に連なる下位系統に存在する発電所からの供給とを差引し、図の基幹系統から供給される有効電力需要を表し、そのような需要の合計は8460MW(参考としてこの地域全体の送需要は、この値の約2倍である)となっている。各負荷は定電力負荷とし、その力率は275kV母線上において一律に0.9(遅れ)としている。また、発電機母線については、無効電力出力に上限を設けている。本モデル系統では、この値を有効電力出力の1/2と設定している。このことは、換言すれば、発電機の母線電圧維持能力に限界のあることを意味する。各負荷変電所の500kV母線と275kV母線との間には負荷時タップ切替変圧器を配置している。変圧器タップは各変電所の275kV母線の電圧を監視し、基準電圧1.0puに対して表1に示す制御特性によって個別制御を行う。なお、各負荷母線にはSCを設置しており、各SCはタイムスケジュール運転されているものとし、その投入量は、負荷増加開始時点において各変圧器のタップ比が1.0で、275kV母線電圧が1.0puとなるように設定している。したがって、ここでの検討においては母線電圧の変動に対して、原則として変圧器のタップ制御のみによって基準電圧への回復を図るものとし、別にSCの効果を吟味してある。

### 2・2 負荷増加

本モデル系統における負荷増加として、昼休み中の負荷の「極小」(全系負荷8.01pu)から全系の負荷が2%/分(0.16pu/分)の割合で一律に増加し、10分後に最大負荷(全系負荷9.61pu)に達する状況を想定している。この負荷の増加分に対する発電機の出力増加は、ここでは発電機4Bが1機で負担するものとして

表1 変圧器タップの制御特性

動作条件	不感帯±1%, 積分動作(60%秒)
動作時間遅れ	10秒
タップ比	0.95~1.05, 0.01刻み

いる。これは、発電機4Bが大容量発電所を想定しており、しかも500kV基幹系統から電氣的に遠く、本モデル系統にとって電圧安定性上厳しいと考えられるケースを意図的に取り上げるためである。また、発電機5A、5Bは原子力発電所を想定しており、5Aに関しては、負荷が「極小」の時点で既に無効電力出力制限に達した状態であることから、P-Q指定母線としている。なお、各送電線は最大負荷時においても各々の送電容量が十分な余裕を持つように選定している。シミュレーションは、負荷増加開始時を $t=0$ とし、10秒刻みで10分間行っている。

### 3. 発電機無効電力出力制限によるP-V曲線の急激な変化と電圧崩壊

#### 3・1 負荷増加時

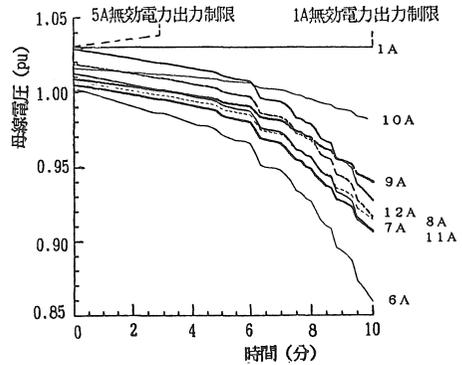
前節に述べた急激な負荷増加期間中におけるシミュレーション結果を図2に示す。同図(a)は500kV母線における電圧の時間的推移、(b)は250kV母線における電圧の時間的推移、(c)は変圧器タップの動作を示す。この結果から、500kV側各母線電圧は負荷増加とともに徐々に低下している。また、250kV母線側では図2(c)に示すように変圧器タップが動作することにより各母線電圧は1.0puにほぼ維持されているものの、タップが上限にかかった時点でそれに対応する母線では電圧の低下がみられる。さらに負荷増加に伴う各発電機の無効電力供給増加により $t=8$ 分50秒の時点で発電機5Bが無効電力出力制限にかかり、P-Q指定母線となるため図2(b)に示すように母線5Bの電圧低下が始まっている。さらに、 $t=10$ 分の時点で発電機1Aも無効電力出力制限にかかっている。図2に示すケースにおいては、変電所6において500kV側も250kV側も母線電圧低下が最も著しい。これは、変電所6が基幹系統から電氣的に遠く、しかも需要がかなり大きいためである。本論文では以後の解析においてこの母線6Bに着目する。

ここで、負荷増加期間中の母線6Bにおける運用点の推移を検討するため、図3に母線6BのP-V曲線を示す。同図の3本の曲線L、M、Nは以下の三つの時点におけるP-V曲線である。

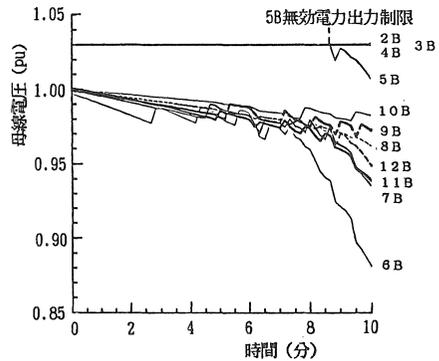
曲線L：負荷増加開始時( $t=0$ )

曲線M：発電機5Bが無効電力出力制限に達した時( $t=8$ 分50秒)

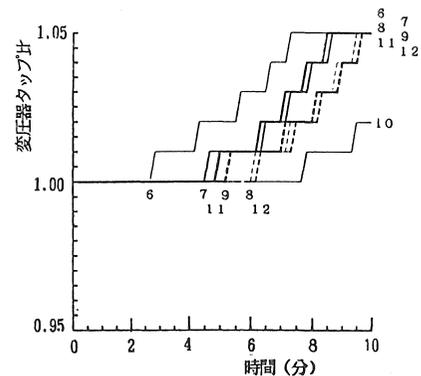
曲線N：最大負荷時( $t=10$ 分)



(a) 500kV母線



(b) 275kV母線



(c) 変圧器タップの動作

図2 負荷増加による電圧低下過程

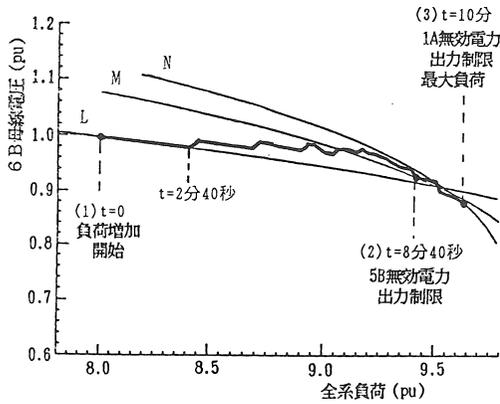


図3 負荷増加時における母線6BのP-V曲線と運用点の推移

実際は上記以外の各時点においてもP-V曲線はタップ動作毎に対応して存在し、あるP-V曲線上を推移していた運用点は系統状態が変化する(変圧器タップ切換等)毎に新たなP-V曲線上に移動する。この様な運用点の推移を図では太線で示す。運用点は $t=0\sim 2分40秒$ までは曲線L上をたどり、ここで図2(c)に示すように6A端子の変圧器タップが1段上がり、図3では示していないが別のP-V曲線に移動する。その後、 $t=8分40秒$ の時点で発電機5Bが無効電力出力制限にかかることによって曲線M上に移る。ここで、曲線LおよびMを比べると、曲線Mの傾きがかなり大きくなっている。これは、この時点で、発電機5Bが無効電力出力制限にかかることにより、モデル系統内の電圧指定母線の数が減少し、系統の電圧維持能力が低下したためである。図3で示すように最大負荷時( $t=10分$ )においては発電機5Aならびに5Bが無効電力出力制限にかかっているものの、運用点は、いわゆるP-V曲線の「ノーズ」に達しておらず、この負荷増加期間中を通じて電圧安定性が維持されている。

### 3・2 送電線1回線脱落

このモデル系統では昼休み後の急激な負荷増加のみに対して本モデル系統は電圧崩壊に至らなかった。そこで、この負荷増加期間中にさらに過酷な系統擾乱として、いずれかの平行2回線区間において1回線脱落が生じた場合を想定してシミュレーションを行った。ここでは、以下に示す各送電区間において $t=2分$ の時点で1回線脱落するものとした。

ケース1：負荷の増加分を負担している発電機4Bと500kV基幹系統とを結んでいる電源線4B-11B、

ケース2：遠隔地負荷6Bにつながる送電線6A-7A、  
ケース3：基幹系統の中央部7A-8A。

ケース1におけるシミュレーション結果を図4に示す。同図(a)は500kV母線電圧の時間的推移、(b)は250kV母線電圧の時間的推移、(c)は変圧器タップの動作を表している。両電圧階級において送電線1回線脱落に伴うステップ的な電圧低下の後、同図(a)に示すように500kV母線電圧はほぼ全母線にわたって時間の経過と共に著しく低下する。また、同図(b)の275kV母線においては同図(c)に示すような変圧器タップの動作のためしばらくの間は大きな電圧低下は見られない。しかしながら、 $t=6分40秒$ に発電機5B、 $t=7分20秒$ に発電機1Aがそれぞれ無効電力出力制限にかかり、変圧器タップが次々に上限に達するにつれ、それ以降いくつかの母線で急激な電圧低下が見られる。その後、さらに7分40秒の時点で発電機4Bが無効電力出力制限にかかることにより系統は電圧崩壊に至っている。このケースにおける系統の運用点の推移を観察するため母線6BにおけるP-V曲線を図5に示す。同図には以下の5種類の系統状態にそれぞれ対応するP-V曲線を描いている。

曲線L：負荷増加開始時( $t=0$ )

曲線M：送電線4B-11B 1回線脱落時( $t=2分10秒$ )

曲線N：発電機5B無効電力出力制限( $t=6分40秒$ )

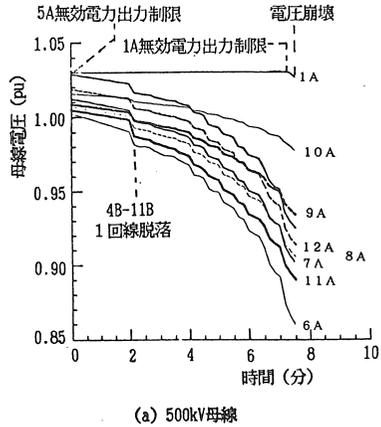
曲線O：発電機1A無効電力出力制限( $t=7分20秒$ )

曲線P：発電機4B無効電力出力制限( $t=7分40秒$ )

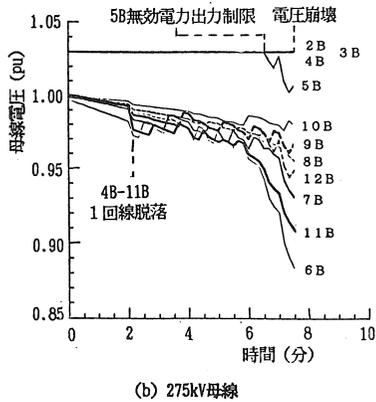
同図からは、発電機が無効電力出力制限にかかる毎に、その系統状態におけるP-V曲線のノーズが有効電力の小さくなる方向に急激に移動し、それに伴ってP-V曲線の傾きが大きくなっていることがわかる。このP-V曲線の急激な移動により、母線6Bの運用点は $t=7分20秒$ の時点で曲線Oのノーズにかなり近づいている。そして $t=7分40秒$ の時点において、全系負荷は9.24puに達しているにもかかわらず、発電機4Bの無効電力出力制限によりP-V曲線のノーズは9.23puであるため、この全系負荷に対する運用点は存在しなくなり、電圧崩壊に至っていると判断できる。

同様にケース2の送電線6A-7Aにおける1回線脱落を想定したシミュレーションを行なった。本ケースにおける母線6BのP-V曲線を図6に示す。同図には以下に示す四つの系統状態にそれぞれ対応するP-V曲線を描いている。

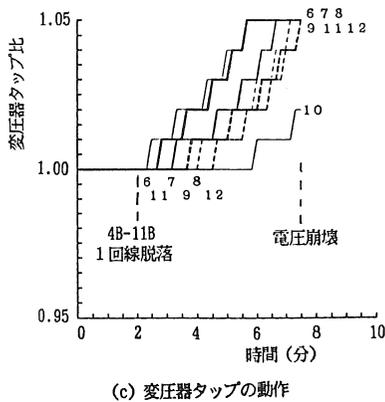
曲線L：負荷増加開始時( $t=0$ )



(a) 500kV母線



(b) 275kV母線



(c) 変圧器タップの動作

図4 負荷増加と送電線4B-11B 1回線脱落による電圧崩壊過程

曲線M：送電線6A-7A 1回線脱落時( $t=2分10秒$ )  
 曲線N：発電機5B無効電力出力制限( $t=5分10秒$ )  
 曲線O：電圧崩壊( $t=5分30秒$ )

同図から、送電線6A-7A 1回線脱落後、発電機5Bの無効電力出力制限によりP-V曲線のノーズが前述のケース1と同様に急激に運用点に接近していることがわかる。本ケースでは、 $t=5分30秒$ の時点で変電所12の変圧器タップが動作しており、このためP-V曲線のノーズが図上でわずかに左方向に移動(縮小)し、電圧崩壊に至っている。

ケース3の送電線7A-8A 1回線脱落を想定した場合についてもシミュレーションを行った結果、発電機5B等で無効電力出力制限にかかることによりP-V曲線のノーズが急速に運用点に接近し、電圧崩壊に至ることを確認している。

以上の三つのケースから、本モデル系統においては負荷増加あるいは送電線1回線脱落による全系の無効電力消費の増大に対し、発電機の無効電力出力

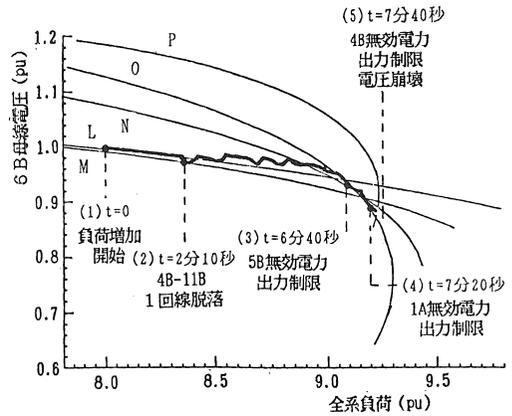


図5 負荷増加と送電線4B-11B 1回線脱落時のP-V曲線と運用点の推移

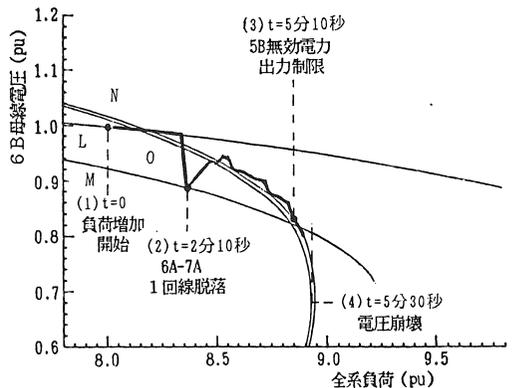


図6 負荷増加と送電線6A-7A 1回線脱落時のP-V曲線と運用点の推移

が制限にかかることにより, P-V曲線のノーズの急激な縮小が起きており, これが主要要因となって電圧崩壊に至ることがわかった。そうなる時間的推移として, 単に負荷増加期間中に1回線位が脱落してもすぐに電圧崩壊に至るわけではない。1回線脱落( $t=2$ 分)後から2, 3分程度まではP-V曲線の下向き勾配が次第に大きくなっていくにすぎない。しかし, 1台目の発電機が無効電力出力制限にかかる頃からは勾配の増加が著しく, それから崩壊までの時間的余裕は1分以下となっている。したがって, 将来, 評価指標での判定を下すとしても, あまりクリティカルになってからでは対策を講ずる時間的余裕がないものと予想される。

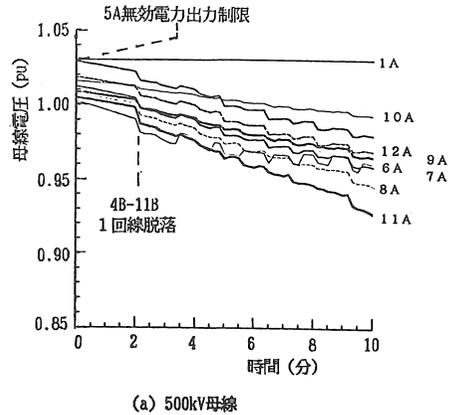
4. SC個別制御による電圧崩壊の回避

3・2節で述べているように, 急激な負荷増加期間中の送電線1回線脱落を想定した非常に過酷なケースにおいて, 本モデルシステムは発電機の無効電力出力制限を経て電圧崩壊へと至っている。これは本モデルシステムにおいては有力な電圧調整手段であるSCをタイムスケジュール運転と想定しているためであると考えられる。そこで本章では電圧崩壊回避のため, 変圧器のタップ制御に加えてSCの投入による系統電圧制御を併用することを考え, その効果を検証する。ここでは送電線4B-11B1回線脱落時(上述のケース1)においてSCの個別制御を行なった場合を検討対象としている。

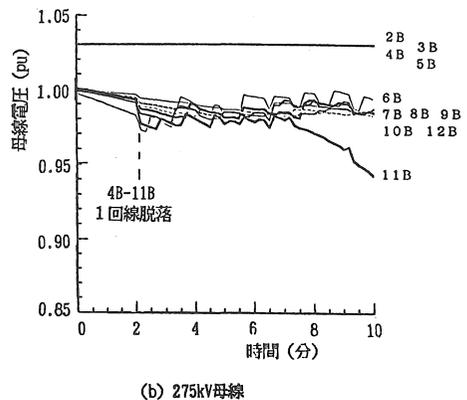
SCは表2に示す制御特性に従い, 各変電所において500kV母線の電圧を個別に監視・制御するものとしている。本ケースにおける母線電圧の低下過程及びSCの投入量の変化を図7に示す。同図(c)にみられるように, 負荷増加および送電線4B-11B1回線脱落による電圧低下に対し, 全系においてSCが投入されており, その結果, 発電機5Aを除いて無効電力出力制限に至っていない。また275kV母線の電

表2 SCの制御特性

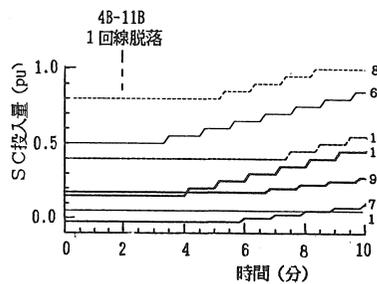
動作条件	不感帯±2%, しきい値制御
動作時間遅れ	60秒
投入単位量	0.050pu(6B, 8B, 10B, 11B, 12B) 0.025pu(7B, 9B)
投入量上限	1.00pu(6B, 8B, 10B, 12B) 0.50pu(7B, 9B, 11B)



(a) 500kV母線



(b) 275kV母線



(c) SC投入量の増加

図7 SCを個別制御した場合の電圧低下過程(ケース1にSCを併用した場合)

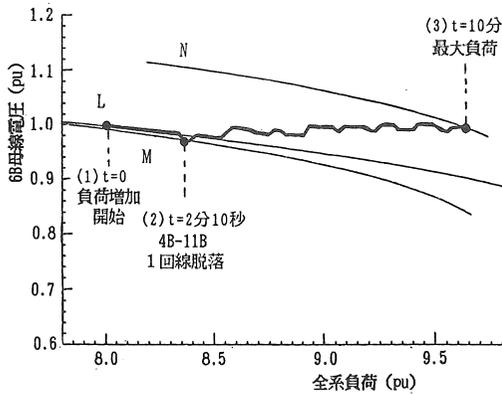


図8 SCを個別制御した場合の母線6BのP-V曲線と運用点の推移

圧はタップとSCと両方の効果により基準電圧(1.0pu)付近に維持されていることがわかる。本ケースにおける母線6BのP-V曲線を図8に示す。同図には以下の3種類の系統状態に対応するP-V曲線を描いている。

- 曲線L：負荷増加開始時(t=0)
- 曲線M：送電線4B-11B1回線脱落時(t=2分30秒)
- 曲線N：最大負荷時(t=10分)

同図から、急激な負荷増加及び送電線1回線脱落という非常に過酷な系統擾乱の下、t=10分の時点においても無効電力出力制限に至っているのは発電機5Aのみであるため、母線電圧はほぼ基準電圧(1.0pu)を維持しており、すべてのP-V曲線の傾きも緩やかに保たれており、安定した運用状態を保っている。比較のため変電所6あるいは変電所11のみにおいてSCを個別制御した場合についてもシミュレーションを行ってみた。これらの場合には、全系からみればSC投入量が不足のため、発電機5B、1Aなどが無効電力出力制限にかかり、電圧崩壊に至ることを確認している。

## 5. あとがき

本論文では、わが国の大都市を中心とする典型的なモデル系統を構築した。その構成は6機20母線から成っており、形態は通常とられているような放射状としてある。その大規模モデル系統において、昼休み後の急激な負荷増加(0.16pu/分)期間における系統電圧の安定性を具体的にシミュレーションした。その結果、単なる負荷増加のみでは電圧崩壊に至ら

なかったものの、この期間中にいずれかの送電ルートで1回線脱落が重複して発生した場合には、無効電力出力制限に至る発電機が相次ぎ、ついには系統が電圧崩壊に至ることを確かめた。この電圧崩壊は各発電機が無効電力出力制限にかかることによってP-V曲線のノーズが有効電力の小さくなる方向に急激に移動し、P-V曲線上に運用点が存在しなくなることが主な要因となり発生している。また、この場合の時間的推移として、1回線脱落があっても、数分間のオーダーで変圧器タップの動作により電圧を維持しているが、発電機が無効電力出力制限に達するものが現れ始めると、急速に電圧崩壊に至ることがわかった。この電圧崩壊を回避するため、SCの個別制御を行えば、各発電機が無効電力出力制限に達する時期が遅れ、電圧崩壊が回避できることを示した。

終わりに、本研究の実施に際して、有益なご助言を賜りました名古屋大学工学部電気学科鬼頭幸生教授ならびに同松村年郎助教授に対し、厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- (1)横山・熊野・関根：「潮流多根解を利用した静的安定指標」電学論B, 110, 870(1990年)
- (2)阿部・西谷・長谷川・藤原：「電力系統における潮流多根計算法と解の特性に関する検討」電力技術研究会, PE-82-12(1982年)
- (3)橋本・餘利野・田村：「電力系統における電圧安定性余裕の常時監視について」電学論B, 108, 2(1988年)
- (4)餘利野・増田・佐々木・西亀・田村・北川・大下：「電力系統における電圧安定度の分類とその解析」電学論B, 110, 357(1990年)
- (5)矢島・佐藤・芹澤：「負荷特性の電圧依存性を考慮した電圧崩壊現象の解析」電力技術研究会, PE-89-16, (1989年)
- (6)田中・長尾・竹中：「基幹系統における電圧不安定現象の解析」電中研報告, T88091(1989年)
- (7)三輪・早川・後藤・鬼頭・藤田：「串型モデル系統における急激な負荷増加期間中の電圧安定性」電力技術研究会, PE-90-27(1990年)

(受理 平成7年3月20日)