

# 電力の輸送と貯蔵

## Transmission and Storage of Electric Energy

末定 泰彦\*

Yasuhiko Suesada

### 1. まえがき

電力は生産と消費が同時に行われる点では特異な商品である。電力は瞬時に発電端から消費端に到着するものであるから、物質輸送と同等な意味での時間的・空間的搬送は存在しない。生産端と消費端の間には輸送設備（送電設備・変電設備・配電設備）が固定設備として存在し、この中で電力の輸送が行われる。

この系においては、まずエネルギーの授受が（系内の損失・慣性力の取り込みや排出などを含めて考えて）、均衡するよう調整されなければならない。需要端における電圧・周波数が供給規定値に合致するような調整も必要である。電圧調整は複雑な電力ネットワーク内の潮流を調整する手段になっている。周波数は系内のエネルギー平衡のインデックスに相当する。需要端で使用される機器の種類・状態によって、供給電圧位相に対する負荷電流位相、力率が変化する。力率と対応して無効電力と呼ぶ要素が系内に存在して流れる形となり、この調整も電圧調整上重要である。

電力の輸送は常時おこなわれる。従って、落雷・発電機停止等さまざまな外乱が系に入ってきた時、これに防御対処し、被害範囲をゼロないし極小に留める調整および設備上の対策も、電力輸送上極めて重要な技術的位置を占めている。

第一にあげたエネルギー均衡調整であるが消費に発生電力を追従的に調整して行く。これによって、概念的に下流側にある設備へ電力の輸送が自動的に行われる状況となる。調整という用語が表面にあり、電力貯蔵やその放出が表面に出ていないが、電力変換が迅速に行える貯蔵に適した他のエネルギー形態が存在し、これを調整変換して電力とすると言える。耳慣れた貯水池という用語にも電力を位置エネルギーとして蓄える概念がある。応答の早い火力電源を想定すれば、化

石燃料自体を電力貯蔵の一形態と拡張できることも理解されよう。電力貯蔵をこうした広い観点から捉えることが時に有効である。

最近、電力貯蔵が従来にない重みを以て強調されるようになったのは、原子力発電というベース向け電源の比率増加があり、生活手段の高度化により昼夜間需要格差の拡大の傾向が強まってたことが一因としてあげられる。これに伴い生産＝消費という拘束下の調整操作遂行のため電力貯蔵の重要性が増大しているのである。

他の大きな要素として、昼夜間需要格差の増大による電力設備の経済性低下を防止する必要性の増大がある。電気事業は典型的な設備産業であって、その収入の可成の部分を設備の償却・維持に充てる必要がある。電気設備は過負荷へと耐性が小さく、予想される最大需要に対応できる設備能力が必要である。この設備能力ないし余裕の必要性は発電設備のみならず、全設備に当てはまる。

ここから類推できるように、有効な貯蔵設備があれば、設備の利用率を向上し、新規設備投資を減少または先送りできる効用を見込むことができる。貯蔵設備が必要中心に近ければ、発電設備のみならず輸送設備にも同様な効用が現れる。勿論、電力貯蔵設備への投資は必要であるから、効用はこの点を相殺して考えなければならぬ。

電力貯蔵への序論として言及しておきたいのは、昼間の最終需要目的に合致する（電気以外の）エネルギー媒体を夜間電力で作り、昼間まで媒体を貯蔵する方式も、結果において電力貯蔵と同一の効果を持つことである。これは夜間需要開発・需要誘導策等の名前で呼ばれることが多いが、温水貯蔵・冷熱貯蔵などで既に馴染み深いものである。

需要格差には昼夜間のもの他、週日と週末の需要格差、季節の需要格差等が存在する。夏の電力ピークが新聞紙面を賑わすことが示すように、夏季の電力需

\* 関西電力㈱研究開発部 調査役  
〒530 大阪市北区中之島3-3-22

表1 各種電力貯蔵方式と建設費推定

技 術	米 国 (1984年価格) *				フランス (1985年価格)		日 本 〔万円/KW〕
	電気出力 〔MW〕	建設期間 〔年〕	発電プラント 〔\$/KW〕	貯蔵設備 〔\$/KWH〕	発電プラント 〔\$/KW〕	貯 蔵 設 備 〔\$/KWH〕	
揚水 (在来型)	1000	10	600	10	1200-2000	2- 100	15- 20
鉛蓄電池	1	1	200	156	500-2000	500-1000	150-200
新型蓄電池	1	1	190	132	-	-	170-220
圧縮空気(MAXI)	220	4.5	560	2	-1200	1000-2000	16- 22
圧縮空気(MINI)	25	2.5	445	5	-2000	30- 200	-
地下揚水	2000	14	600	30	-	-	-
海水揚水	150	-	-	-	-	-	75(パイロット)
フライホイール	1	1	140	600	-	-	-
超電導(15年後)	1000	6	140	160	-	-	25- 30

(参考文献6より引用)

要ピークが最大で、設備形態にも大きな影響を与えている。季節に跨る大規模な電力貯蔵ないしは等価な貯蔵には現存する技術手段はなく、自然力等を利用した技術開発は今後の課題である。週日と週末の需要格差は昼夜間格差の延長線上で考えられるので、本文では昼夜間需要格差に対する電力貯蔵の観点で取り扱うこととする。

電力貯蔵には表1に示す種々の方式が考えられるが、現に実用されているのは揚水発電が唯一の方式である。今後、超電導電力貯蔵 (SMES)、電池電力貯蔵、空気貯蔵発電などがそれぞれの特性を持ちながら登場して来ると考えられる。電池電力貯蔵では電力会社が電力貯蔵を目的とした設備を設置する方向と、電気自動車のような需要家側の装置で需要を喚起する方向とが考えられる。

今後、コージェネレーションの普及に代表されるように、より合理的なエネルギー利用を求める競争的な環境が一般的となり、電力輸送・貯蔵の柔軟性を求める動きは一層活発化する方向にある。

## 2. 電力の輸送

電力の輸送を効率化するのに最も効果的な方法は、高電圧化によって導線内に発生するジュール損失を小さくすることである。このため、送電から配電に至る各ネットワーク段階で高電圧化が進められている。

都市中心から離れた電源から大電力を都市まで搬送する幹線には、超高圧送電に相当する最も高い電圧を使用する。超高圧とは通常200KV以上を指すが、275KVは普通のものとなり、現在主力は500KVに移っている。東京電力等では離隔地からの送電に超々高圧1,000KV (100万ボルト) の採用計画がある。

超高圧送電線は線下用地が広く必要であり、電波障害などで都市近郊では種々の問題を生じやすいから、メトロポリタン外縁に環状に一次変電所を設置し、また環状の幹線送電線をも設置して、各方向からの電力流入を受け入れ降圧し安定度向上をはかる方式が多い。東京・大阪・名古屋などのメトロポリタンでは2重環状の外輸線も普通である。1次変電所から2次・3次変電所まで順次降圧しながら負荷中心に導入する。これらの変電所間で使用される電圧は各社によって少しずつ異なるが、外部からは特に意識する必要はない。一方、末端の配電電圧の選定は需要家にとって密接な影響がある。戦後の配電電圧 (一次側) は3KV程度であったが、今日では都市中心部では20KV級、市外部でも6KVが標準である。高圧配電線に被覆線を使う安全度の高い方式が採用されるようになり配電電圧昇圧が順調に進んだ。

家庭内の電圧は100Vが日本国内の基準電圧になっているが、単相3線200V化が進んでいる。単相3線200V配電では、中性線と1線間では100V機器が使用でき、200V機器も使用できる利点がある。

最近の家庭内では使用機器の大型化が進み機器の同時使用数が増大する傾向にあるが、配線容量を最大使用状況にあわせて設定するという電気設備特有の条件があり、低電圧では次第に無駄が表面化し、家庭内の機器多様化にも拘束が目立つようになる。こうした障害を避けるため、家庭内配線電圧を本格的に200V化しようと、通産省を核とした全国大での検討と呼掛けが始まっている。尚、工場・ビルでは440・220V系が広く使用されている。

このような高電圧化は系内損失を極力小さくする努力とも言えるが、同列のものとして、変圧器の性能向

上がある。磁性珪素鋼板性能向上による変圧器の鉄損軽減・小型化も効果をあげており、さらにアモルファス磁気材料による一層の効率向上を計る動きもある。

送電系統は、全国にまたがるネットワークを形成しており、各送電線には複雑な電力潮流が生じる。これらにかかわる問題を系統問題・潮流問題等と呼んでいる。潮流は人為的に調整可能であり、全国大の中央給電司令所から各社・地方に到る各段階の給電指令所がこの役割を果たす。

ひとつの電力会社と隣接する会社の系統を図-1aのように模式的に書いて考察しよう。すでに述べたように、電力系統で最も重要なのは発電力と需要の均衡である。均衡が成立している状況において、系統の周波数は50または60ヘルツに保たれている。ここで発電力不足が発生したと仮定すると、系の周波数が低下しようとするが、その以前に他社系統との間に位相角増加を生じ、これから連絡系統（送電線）により電力が流入して不足電力を補い、周波数の低下は微小に留まる。系統の連系は、周波数の変動を少なくし、安定度

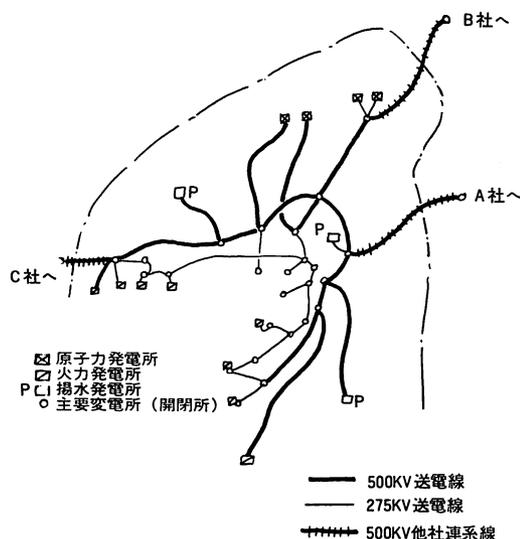


図-1a 系統構成と他社連系の概念図

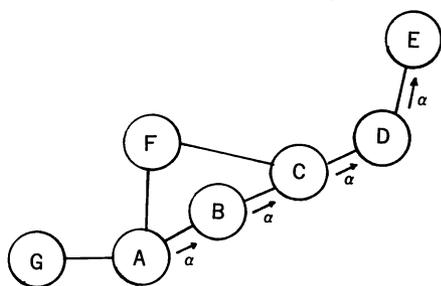


図-1b 広域融通の概念図

と電力品質の向上に寄与することとなる。また周波数維持のため各電力会社が準備しなければならない予備発電力を縮小できる。

次に図-1bのようにA電力から遠方のE電力への電力輸送が必要となったケースを考える。中間にB, C, Dの各電力が介在しているものとする。ここで各電力が協約して系内発電力を調整すると、直接A電力からE電力への送電したのと同等なエネルギー授受が行われ、かつ送電損失は直接AとE間に送電線を仮想して利用した時よりも小さい。系統連系によるこの種の有利な融通は広範に行われ、広域融通・電力融通等の用語で呼ばれる。米国公益事業規制政策法（PURPA）は自家用電力についても電力会社の託送を義務付けており、託送料は電力会社の増分費用を基礎として算定する。運用上で種々問題はあるようだが、エネルギー利用の高度化を図る理念は注目すべき点である。

275KV級の超高圧送電線の場合でも1回線の送電可能容量は[100万KW×100KM]が安定限界の目安である。[距離×潮流]がこの限界以上に増加すると、送電端と受電端間の位相差が増大し安定度が低下する。この程度の送電潮流・送電距離は、並行2回線の1回線脱落といった場で現れるもので、大容量発電所からの送電安定度を考えるに当たって考慮しなければならない点である。

直流送電は交流送電の様に位相差の問題がなく、構成線数が少なく済む所から、特に長距離送電に適している。北米・北欧・ソビエトでは実用例がある。日本では北海道・本州連絡線、50/60ヘルツ変換装置で実用されているが、長距離送電とはやや趣を異にした適用である。

負荷機器の中でも電動機による動力負荷は遅相電流をとる。即ち遅れの無効電力を消費する。これに対しては発電端を主体に無効電力を供給しなければならない。系内を流れる無効電力潮流はエネルギー均衡とは直接関連しないが、輸送線路内の電圧降下には直接影響する。従って給電所・変電所等は連絡を取り合って無効電力潮流見合いで発電機電圧、変圧器の電圧タップの調整等を行い、電圧を調整する。

電力の輸送問題を考えるに当たって注意を払わねばならないのが、事故時の対策である。末端の配電線は都市中心部を除きツリー状構成となっているので、事故範囲は小さいが、需要家の停電に直結する。また最近のパーソナル計算機に代表される各種の電子機器の普及が著しいが、これらは瞬間停電に対しても障害を生

じる傾向があり、問題となっている。ループ状配電となっている都市中心でも瞬間停電は避けられない面があり、問題は全面的である。配電線に絶縁電線採用率が高まり、単なる接触では停電事故に到らないことから、全般的意味での配電信頼性は向上した。

送電線事故は、ループによる別供給路・高速再閉路等技術等によって需要家が直接停電に曝されることは少なくなっている。外乱には風害・雪害・塩害等いろいろあるが、雷害がもっと問題となる。雷により送電鉄塔にのっている2回線を同時短絡等が発生するからである。

幹線送電線（通常2回線以上）が事故停止した場合、系に対する供給力不足に至ることが多い。周波数の低下を検知した他の発電機の调速装置や系統周波数調整装置によって系内の発電出力が増加し、連系送電線からの流入電力も増加して再平衡が取れる。しかし、事故→再平衡が可能なのは不足不平衡がある限度以下という条件があり、大きな不平衡が発生すると、連系送電線も潮流過大で切り放され、周波数が低下、大型タービンを使用している発電所が機械保護の為に脱落等、悪循環を生じ系が崩壊する。これがBlack Outと呼ばれる大事故現象である。系統崩壊は30秒から5分程度の経過時間内で起こっており、対策は比較的健全な区域（エネルギー均衡のとれている区域）と他の区域とを早期の系統操作により切り放すことである。

電圧・無効電力が関与して大規模停電を惹起した事



図-2 美化配電柱

例は少ないが、62年7月関東一円で発生したものは、折からの暑熱で家庭用の空調が一斉に稼働して初期電圧降下をひき起こし、急激に普及したインバーター方式の定電力特性により消費電流が更に増加し、系統変電所が電圧降下を検知して遮断し広域停電に到ったと分析されており、マイクロな機器の特性変化が予想外の支障を及ぼすに至った点で注目されている。このような事故例からも、消費中心に近く位置する都市型電源の重要性が再認識される。

都市部を中心とした配電輸送問題を眺めると、需要密度の増大にともない、配電線の巨長は平均1.5KM程度に短くなっており、変電所用地の取得も困難になっている。SF<sub>6</sub>を全面的に使用したガス絶縁変電所でコンパクト化を計り、変電所を通常のビルディングの地下部分に収容する対策等がとられている。

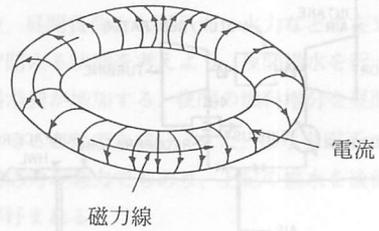
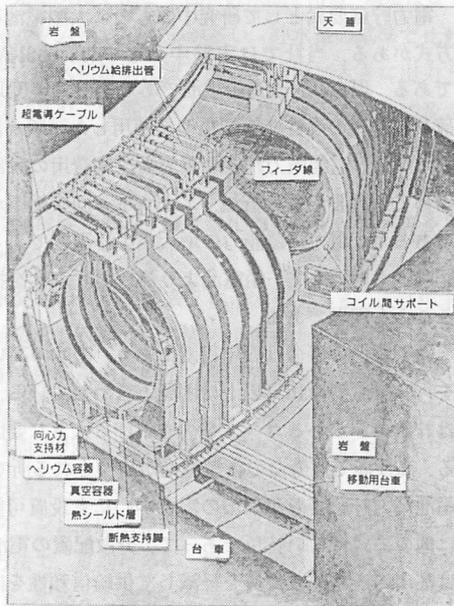
都市美観の観点から配電線・配電機器を地下に埋設する方向の改善意見が多いが、地中化は所要投資が格段に大きく、事故時修理時間も長時間化する傾向が強いなどの欠点を伴う。投資費用は料金収入によって回収されねばならないから、これらの条件を考慮に入れた上で地中化が最善かどうか、社会的コンセンサス形成が必要であろう。電力各社も都市中心部から地中化を進め、また図-2に示すような美化装柱への改善を図っている。

超電導の応用領域に電力輸送への適用がある。超電導電力輸送が実現すれば、長距離例えば隣接国からの電力移入も可能となり、あるいは大きな送電線敷地を要せず大電力輸送が可能となる等、社会的にも最大級のインパクトが予想されている。

しかし、電力輸送への超電導応用はもっとも技術的に困難な領域でもある。信頼性の高い冷却方式・磁界遮蔽方法の確立がその主な問題点であり、計算機→リニアモーターカー→発電機・SMESに続く応用領域と考えられる。常温超電導材料の発展によっては、状況が急速に好転する可能性はある。超電導送電線は既設送電線と平行敷設して、信頼性を確認しながら実用化に近付けることが出来る点は有利である。超電導の電力輸送への適用は研究の緒についた所と言えよう。

### 3. 電力の貯蔵

電力の貯蔵装置として、現在国内で実用に供されているのは、揚水発電方式のみである。揚水発電所は、エネルギーを上部貯水池の水の位置エネルギーとして保有貯蔵し、昼間にこれを放出して電気エネルギーを



項目	仕様
蓄積エネルギー	$1.8 \times 10^{13} \text{ J (SGWh)}$
大半径	260 m
小半径	14 m
コイル数	360個
中心磁場	7.2 T (テスラ)
設置位置	地下30m (コイル中心)
超電導体	$\text{Nb}_3\text{Sn}$
冷却系	ヘリウム系
土木工事	2年

図-4 トロイダル型超電導電力貯蔵装置 (SMES)

規模では半径2 KMにも達すると予想されている。強力な磁束はコイルの中に閉じ込められるので、磁束の外部影響は少ない。エネルギーは磁束として蓄えられ、直流電流を使用するので、外部との連結には交直変換装置が必要である。超電導材料が液体窒素冷却下で作動するのか常温で作動するのかが装置に付属する冷却装置の規模等が著しく異なるが、現状は双方を想定している概念設計が進められている段階である。SMESはSORや大出力レーザーのように、瞬発的な超大電力を必要とする装置の電源装置として最適であるとされる。エネルギー貯蔵全量が比較的小さく、従ってSMESとしても小型の装置で済むからである。この種の電源装置として普及が先行し、その技術が電力貯蔵装置に導入されて地位を確立する過程を経ると予想される。

水素貯蔵も熱心に提唱されているが、水素から電力への転換装置にあたる燃料電池の効率が重要なので、一般燃料利用の燃料電池が高効率を持った後に本格化する方式であろう。

フランスEdFでは、発電所の深夜余剰を「蒸気+飽和水」のアクümüレーター形式で貯蔵する試みがあると伝えられるが細部は不明である。何れにしても大容量のものは困難である。

揚水発電に海水を用い、立地可能範囲を広げる方式も考えられているが、技術的には現在の揚水発電と同等である。

#### 4. その他

当初に述べたように電力はそれ自体としては貯蔵が困難なエネルギー形態であり、今まで示した各種の貯蔵装置の多くはエネルギーを位置エネルギー・圧力エネルギー・電気化学エネルギー等に変換して保有するものであった。

この観点を延長すれば、昼間に最終的に電力が使われる用途の作業を夜間電力で行って貯蔵し、昼間に抽出して最終使用に充てるような装置も一種の(電力)

表3 家庭用電気料金の概要 (関西電力)

昭和63年1月1日から

		契約種別	単位	料金単価
従量電灯	甲	最低料金 (最初の15kWhまで)		1契約 円銭 315.00
		電力量料金	15 kWh 超過 120 kWh まで	第1段 1 kWh 19.40
			120 kWh 超過 250 kWh まで	第2段 " 25.70
			250 kWh 超過分	第3段 " 28.85
深夜電力	乙 (低圧)	基本料金		1 kW 290.00
		電力量料金		1 kWh 8.60
		通電制御型(マイコン)電気温水器については、深夜電力乙の料金単価で計算した金額からその12%を割引。		

(表は家庭用需要に関するものに限定)

貯蔵装置と考えることができる。夜間温水又は冷水を製造し、これで昼間暖房・冷房を行う蓄熱方式が代表的なものである。これらの技術は本誌でも再三記載された所であり、説明は省略する。この種の負荷創出には料金政策が大きく影響する。昭和63年1月の料金改訂で各電力は深夜割引率を大幅にし、表3に示すように熱源としても他種エネルギーとの競争力を持ち始めている。

以上簡単に電力の輸送・貯蔵に関する現状と将来とを眺めた。最近に至って始めて電力にまつわるエネルギー高度利用技術が急速に整備され、各種エネルギー源間の競合関係も本格化してきた感がある。電力は高度な情報機器のエネルギー源として、また安全かつクリーンな熱源として需要家の広い要望に応じて行かなければならないことを痛感する。

季節間にまたがるエネルギー貯蔵は視野に入る技術がないが、自然力を巧みに利用しながら開発を進めなければならない領域である。

電力需要の昼夜間格差を残したまま、是正を貯蔵装置にのみ依存してもコスト低減効果は弱いであろう。やはり長期には、自然な形での深夜需要開発が大きな意義を持っている。

### 参 考 文 献

- 1) 吉田他; 茂住鉦におけるエアレシーバー構築について、日本鉱業会誌74年5月
- 2) 大高・岡崎; 新型電力貯蔵システム, エネルギー・資源研究会誌87年3月
- 3) 増田; 超電導コイルによるエネルギー貯蔵, エネルギー・資源研究会誌88年1月
- 4) アメニティカーの技術開発動向, エネルギーレビュー88年2月
- 5) 玉貫; 海外主要国の電気事業の近況, 電気評論88年2月
- 6) 内山他, 電力貯蔵の経済性比較, エネルギー・資源研究会#5エネルギーシステム経済コンファレンス資料88年2月

### 協 賛 行 事

## 日本機械学会 第669回講習会 多様化するエネルギー環境

<日 時> 昭和63年6月16日(木) 9:00~16:50

<会 場> 家の光ビル会議室

東京都新宿区市ケ谷船河原町11, 電話 (03)260-4791~3

JR(総武, 中央線), 地下鉄(東西, 有楽町線) 飯田橋駅下車 徒歩5分

<内 容>

9:00~10:00	(1)新エネルギー開発と環境の将来……………	日本大学	一色尚次
10:00~11:00	(2)廃棄物処理とエネルギー環境……………	千葉工業大学	平山直道
11:10~12:10	(3)エネルギー環境と電気自動車……………	国立公害研究所	清水浩
13:30~14:30	(4)コージェネレーションについて……………	東京通商産業局	関根昇一郎
14:30~15:30	(5)都市におけるエネルギー環境……………	財団法人電力中央研究所	新田義孝
15:40~16:40	(6)インテリジェントビルとエネルギー環境……………	東北大学	長友宗重
16:40~16:50	総括と将来展望……………	東京農工大学	柏木孝夫

<聴講料> 会員・協賛会員 9,000円(学生員2,000円), 会員外18,000円  
(いずれも教材1冊分代金を含む)

<申込先> 日本機械学会宛