

送変電設備における省エネルギー

Energy Saving on Transmission and Substation Facilities

菅野 弘道*
Hiromichi Kanno

1. ま え が き

近年の石油系燃料価格の高騰に伴い電力原価は上昇し電力損失コストも急激に増大することとなり送変電設備においても省エネルギーは益々重要な課題となってきた。

わが国での送電損失率は昭和20年代後半には kWh 損失率にて約30%また kWh 損失率にて約20%程度であったがその後臨海火力発電所建設などによる電源の需要地近接配置および送電電圧の格上げ等により昭和45年頃にはそれぞれ約8%および6%程度にまで低下した。

しかしながら、近年は

- ・大容量火力・原子力発電所の遠隔化、偏在化による基幹送電線の長距離化、大容量化
- ・架空送電線の大電流化
- ・超高压地中送電線の増加による対地静電容量補償用分路リアクトルの増加
- ・変電所の大容量化に伴う短絡容量抑制のための高インピーダンス化
- ・輸送制限が厳しくなったための機器の分割輸送化等の損失率増加の要因が現われ
- ・送電電圧の高電圧化（275 kV→500 kV）
- ・変電機器の大容量化
- ・架空送電線の大導体化

等の損失低減の努力と相殺し送電損失率の低減は飽和状態が続いている。

上に述べた kWh 送電損失率6%の約半分3%は配電設備によるものであり残りの3%が送変電設備によるものであるが、この送変電設備を500 kVおよび275 kVで代表される基幹送電系統と66 kVおよび22 kVの二次送電系統に分け本稿では主として系統形成の途中にある前者についていかに省エネルギーに取り組んで

* ㈱日立製作所電力事業部送変電技術本部技術部長

〒100 東京都千代田区大手町2-6-2

いるかおよび省エネルギーのためにいかなる技術開発が進められているかについて述べることにする。

2. 送電設備における省エネルギー

基幹送電系統における kWh 損失率のうち約80%は送電線によるものであるため、まず送電設備における省エネルギーについて述べる。

送電設備としては、架空送電線と地中送電線とに大別されるので、それぞれについて送電損失の分析を行い、つぎに各々の損失の低減策を示す。

2.1. 架空送電線

(1) 架空送電線の送電損失

架空送電線の送電損失には、抵抗損、コロナ損、ならびに鉄損があり、表1は275 kVおよび500 kV架空送電線の送電損失電力量の一例を示したものであるが、この表よりもわかる如く一般的に抵抗損が全損失の94~99%を占めており、コロナ損、鉄損は微々たるものである。

(2) 架空送電線の損失低減策

上述のごとく、抵抗損が架空送電線の送電損失の大部分であるので、以下に抵抗損の低減策について述べる。

① 高電圧化

送電損失は電圧の2乗に反比例して増減するので、高電圧化は効果的な対策である。275 kVと

表1 架空送電線の送電損失

送電電圧 (kV)	導体サイズ	年間損失電力量 (MWH/100 km・回線・年)				備考
		抵抗損	コロナ損	鉄損	合計	
275	ACSR 410 mm ² 4 導体	20,100 (98.8)	54 (0.3)	180 (0.9)	20,334 (100)	通電電流 1,000 A 年負荷率 0.6
500	TACSR 810 mm ² 4 導体	11,000 (94.2)	440 (3.8)	240 (2.0)	11,680 (100)	損失係数 0.432 () 内構成 比率%

500kV送電に同一サイズの導体、たとえば ACSR 410 mm²、4 導体を使用した場合、500kVでの損失電力量は275kVの場合の約1/4になる。

② 電線の大サイズ化

同じ通電電流の場合、たとえば ACSR 810 mm²の損失電力量は、ACSR 410 mm²のその約半分程度となる。

③ 多導体化

同じ通電電流の場合、たとえば ACSR 810 mm² 2 導体および4 導体の損失電力量は、ACSR 810 mm²単導体のそのそれぞれ約1/2および1/4になる。

④ 等価導電率の向上

導電率を1%向上すると、送電損失は約1.5%低減するといわれており今後の方向として一番効果的かつ実用的と考えられる。

2.2. 地中送電線

(1) 地中送電線の送電損失

地中送電線の送電損失としては、抵抗損、誘電体損ならびにシース損があり、各損失の構成比率はケーブルの種類即ち OF ケーブルと CV ケーブルおよび送電電圧、送電容量により異なる。

表2は2000 mm²の OF ケーブルで送電容量400 MW の場合の275kVと500kVの送電損失の一例を示したもので、誘電体損は電圧の2乗に比例して増大するため、高電圧系統では誘電体損が大きな部分を占めている。

(2) 地中送電線の損失低減策

つぎに抵抗損、誘電体損、シース損それぞれについて損失低減策を以下に示すが、その低減効果は送電容量および負荷係数により大きく異なるので、潮流等系統条件、適用条件を十分検討した上で、最も経済的かつ効果的な対策を選定する必要がある。

1) 抵抗損

抵抗損は架空送電線と同様に高電圧化および大サイズ化に伴って低減する。また大サイズのケーブルに対しては、分割絶縁を行い、さらに将来技術としては層絶縁あるいは素線絶縁電線の開発が検討されている。

なお後に述べる誘電体損は高電圧化に伴って増大するので、高電圧化、大サイズ化は必ずしも送電損失の低減対策とはならないので注意を要する。

2) 誘電体損

誘電体損は絶縁体の誘電率εと誘電正接tan δに比例し、かつ電圧の2乗に比例して増大する。従って誘電体損を低減するにはε・tan δを小さくする必要があり、このためにε・tan δの小さな低損失絶縁紙が開発されている。最近ではさらに低損失の半合成紙の開発も精力的に進められている。

また誘電体損の低減という点では CV ケーブルが優れた特性を有しているが現在のところ高電圧領域での接続方法等に OF ケーブル程の信頼性がないことより広く採用されていないので将来この適用の拡大が誘電体損の低減に効果的となる。

なおε・tan δを低減すると無効電力も低減され当然補償リアクトルの容量低減にもつながる。

3) シース損

OF ケーブルの金属シース損をさらに分類すると、単心ケーブル特有の閉回路の循環電流によって生ずる回路損とシースが電流源に近いために発生する渦電流損に分けられる。

回路損は一般に渦電流損に比べ小さいのでここでは渦電流損の低減策について述べると

- ① 相間隔の拡大
 - ② 抵抗率の低い即ち導電率の高いシース材料を用いる
 - ③ アルミの高抵抗化
 - ④ ステンレスシースの採用
- 等が考えられる。

4) 強制冷却ケーブル

地中送電線による送電容量がある程度以上大きくなった場合強制冷却が必要となる。強制冷却方式には管路のパイプとケーブルの間を水で充填しその水を強制循環させてケーブルを冷却する管路内直接水冷却方式と洞道内のトラフにケーブルを敷設し別置の冷却パイプ内の水を強制循環させてケーブルを間接的に冷却する間接冷却方式があるがこ

表2 地中送電線の送電損失

送電電圧 (kV)	線種	年間損失電力量 (MWH/20 km・回線・年)				備考
		抵抗損	誘電体損	シース損	合計	
275	OF ケーブル 2,000 mm ²	2,090 (31)	4,100 (60)	610 (9)	6,800 (100)	送電容量 400 MW 年負荷率 0.6 損失係数 0.432 ε・tan δ 3.4×0.2% 相間隔 250 mm
500	同上	640 (7)	8,570 (90)	270 (3)	9,480 (100)	

() 内構成比率 (%)

の冷却システムの省エネルギー化がポイントとなる。特に後者の場合クーリングタワーに加えターボ冷凍機等を必要とするため冷却システムの消費電力が大きくなるので潮流条件、負荷条件に応じた冷却機運転台数の制御等システム全体の省エネルギー化を考える必要がある。

3. 変電設備における省エネルギー

変電所における機器別電力損失量の構成は設備容量、電圧により異なるが代表的規模の500kV変電所の例で変圧器の損失が全体の約77%、分路リアクトルの損失が約20%であり、そのほか所内消費電力約1.6%、電力用コンデンサ約0.8%、開閉装置等の主回路損が約0.6%となっている。この構成比率は電圧が低くなるにつれて変圧器の損失比率が大きくなる。また単位設備容量当りの年間の電力損失量即ちkVA当りのkWhは高電圧、大容量になるほど小さくなっている。

近年変電設備の大容量化による低損失化、変電所をガス絶縁変電所化することによる小形軽量化等損失低減のための努力がつけられているが、一方においては、下記の如き損失の増加を招く要因が増えている。

(1) 短絡容量対策

電力システムの拡大に伴って短絡容量が増大するがこれを抑制するために変圧器のパーセントインピーダンスが高くなっている。このため変圧器の損失全体の約5/6を占める負荷損が増える結果となっている。

(2) 送電系統の変化

高電圧・長距離架空送電線の増加およびケーブル系統の増加により分路リアクトルが、また大容量重負荷架空送電線の増加により電力用コンデンサが増えつゝある傾向にある。

(3) 輸送制限上の制約

変圧器の大容量化に伴い輸送上の制約が損失を増やす要因となっている。即ち輸送上の制約により三相3脚鉄心の変圧器を三相5脚鉄心に、或は三相変圧器を相分割形に、負荷電圧調整器付変圧器を調整器別置形変圧器にすること等により変圧器の損失は約2～10%増加することになる。

このような損失増加の要因にも拘らず総電力損失量を低減すべく、各変電機器に対し如何なる損失低減策が講じられているかについて機器別に述べる。

3.1. 変 圧 器

図-1は275kV変圧器を例として変圧器の単器容量の年代による推移と単位容量当りの損失の推移を昭和

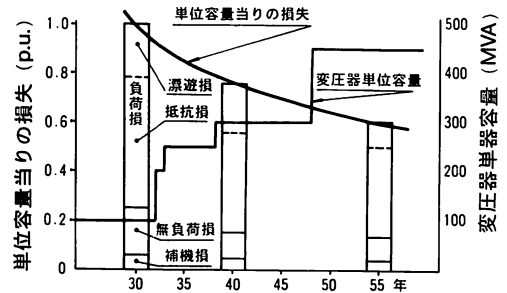


図-1 変圧器の単器容量と単位容量当りの損失の推移

30年をベースとして示したものであるが、この図からも現在の変圧器が大容量化、絶縁方式の改良、鉄心材料の改良、高精度の解析技術、組立技術の進歩等により損失の低減が行なわれ、昭和30年頃の変圧器に比べ単位容量当りの損失が60%以下になっていることがわかる。

また500kV変圧器の例でもUHV変圧器の開発で得られた絶縁方式および高精度解析技術を適用しバンク容量1,000MVAおよび1,500MVA変圧器において従来2組および3組であった並列巻線をそれぞれ1組および2組で構成するようにし大巾な寸法、重量、損失の低減を行っている。

次に変圧器の損失低減策を無負荷損、負荷損および補機損の各々について述べる。

(1) 無負荷損

変圧器の無負荷損の大部分を占める鉄損について述べる。

鉄損に影響を及ぼす因子としては、構造、組立法および材料があるが、それぞれについて以下に述べるような改良を行い過去20年間に約40%程度まで損失の低減を行った。このうち90%は構造の改善と組立法の改良によるものである。

1) 構造の改善

鉄心の締付ボルトの穴あるいは形状を変更し、さらにボルトをバインドつまりテープによる締付けに変更した。また、鉄心の接合を直角接合より額縁接合に変更した。

2) 組立法の改良

コアタイプの変圧器の場合であるが鉄心を平面的に積み巻線と組むために起立させると、その際に鉄心にストレスが加わり損失の増加につながるため、鉄心起立装置を採用することにより損失の増加を防止している。

3) 材 料

ヒステリシス損、渦電流損の少ない高配向性珪素鋼板を使用し鉄損の低減を図っている。

将来の課題としては、新しい鉄心材料例えばアモルファス鉄心材とか高シリコン化鉄心材の開発と変圧器への適用がある。

(2) 負 荷 損

変圧器の負荷損には巻線の抵抗損および巻線、タンクおよび内部構造材で発生する渦電流損とがあり、以下にこれら損失の低減策を述べる。

1) 巻線抵抗損の低減

巻線の抵抗損の低減策としては、①導体面積の増加、②巻回数の低減、③コンパクト化による1巻回平均長の低減があるが、最近のコンピュータを使用した巻線内・巻線間電位分布、巻線内外の電界分布等の数値解析技術の進歩により変圧器全体がコンパクト化され、巻線が縮小されることが最も効果的低減策となっている。さらに変圧器全体がコンパクト化されると鉄心も縮小化され、前項の無負荷損の低減も図れる。

2) 導体渦電流損の低減

導体渦電流損低減策としては、①転位電線の如き細い素線を適用する、②巻線を分割し漏れ磁束の低減をはかる、がある。

3) タンク、内部構造材に発生する渦電流損の低減

この渦電流損の低減策としては、①タンク壁に漏れ磁束シールドを取付ける、②内部構造材を分割し、かつ非磁鋼材あるいは磁気シールドをもうける、③大電流リード近傍にシールドをもうける、等がある。

(3) 補 機 損

補機損即ち冷却に使用される送油ポンプや冷却ファンの消費電力を低減させる策としては、①高効率熱交換器の採用、②新形送油ポンプの使用、③冷却ファンの空気力学的改良等があり、昭和30年頃に比較し約60%程度にまで低減され、補機損率も約2%と改良されている。

また将来技術としては、水の気化潜熱を利用した蒸発冷却およびフロン蒸発凝縮を利用した冷却方式の導入が考えられる。

3.2. 分路リアクトル

分路リアクトルについても、図-2に示す如く変圧器と同様に大容量化、鉄心材料の改良、鉄心構造の最適化・合理化、磁界設計の最適化等により損失低減が図

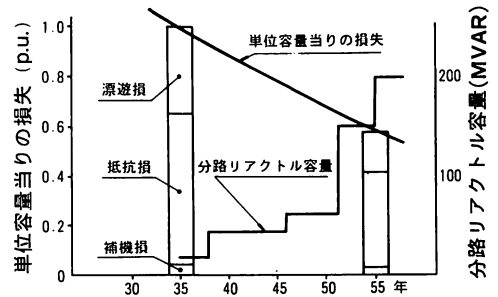


図-2 分路リアクトルの単器容量と単位容量当りの損失の推移

られ過去20年の間に単位容量当りの損失は約50%に低減されている。

今後さらに損失を低減していく方策としては、抵抗損の低減、漂遊損の低減、および分路リアクトル全体のコンパクト化による損失の低減があるので、これ等の低減策について述べる。

(1) 抵 抗 損

抵抗損を減少させるためには電流密度を低減すれば良いが、これはコイル或はリアクトル全体の大型化につながるので輸送その他の関連事項および漂遊損増加の対策を検討する必要がある。

(2) 漂 遊 損

漂遊損を減少させるための方策としては、導体構造および磁気回路構造の改良がある。前者としては空心形分路リアクトルでは特に渦電流損を少なくするような巻線構造とすることであり、また後者としてはギャップ部も含めた磁気回路全体の構成に考慮を払う必要がある。

(3) 分路リアクトル全体のコンパクト化

分路リアクトル全体をコンパクト化するためには磁束密度を大きくする必要があるが振動の原因となる電磁吸引力は磁束密度の2乗に比例して増大するため、振動の解析とこれを防止するための構造の検討が重要である。

3.3. 電力用コンデンサ

電力用コンデンサは調相用コンデンサ、直列コンデンサ、フィルタ、結合コンデンサ等多くの分野で使用されている。

電力用コンデンサの損失が変電所全体の損失の中で占める割合は先にも述べた如く約0.8%程度と非常に小さいがこの損失の構成を最も多く使われている調相用コンデンサの例で見ると、コンデンサ本体の損失が過半数の約55%、直列リアクトルが残りの殆んどの44

％を占めている。さらにこのコンデンサ本体の損失の内容としては誘電体損が約80％、電極箔損が約15％で残りが鉄損、リード線損となっており、また直列リアクトルの損失では銅損が約77％、残りが鉄損23％となっている。

これらの損失の低減策としては絶縁紙の特性改善、絶縁油の改善、プラスチックフィルム化などがあり単位容量当りの損失 W/kVA は最近の20年間で約1/5に低減されている。

3.4. 開閉装置

開閉装置の損失も変電所全体の損失に占める割合は非常に小さく500kV変電所の例で約0.6％程度である。

この損失は主として主回路導体損およびタンク損であるが開閉装置の種類が気中絶縁形からハイブリッド形（タンク形ガス遮断器に断路器、接地開閉器、変流器等を組込んだものと気中絶縁母線または架空線とを組合せたもの）、さらに相分離形ガス絶縁開閉装置（GIS）、154/187kVクラスでは全三相一括形GISへと変わっていくと損失は低減し、154kV、1200Aの開閉装置1回路分の例で言えば損失は約1/7に低減される。

また最近の技術開発によりガス遮断器の遮断点数が500kVにおいて従来の1相4点構成より2点に、240/300kVでは1相2点構成より1点に半減されGISの縮小化および全三相一括形GISの高電圧化が進められている。

なおGISの損失は容量（通過電力）は同じでも機器の配置即ち導体の長さによって大巾に異なる。

3.5. 所内電力

通常変電所の所内電力としては変圧器、分路リアクトルの補機用電力も含まれるが、これらについては変圧器、分路リアクトルの項で述べたのでここではこれを除いたものについて述べる。

この場合所内電力が全変電所の損失量の中で占める割合は変電所の規模により異なるがその割合は約2％程度と小さい。

年間の所内電力量の構成比を代表的275kV屋外用GIS変電所の例で見ると整流器関係が一番多く約60％、つづいて機器ヒータ、屋内外照明がそれぞれ15％程度、その他が空調、コンプレッサ等となっている。

従って所内電力の低減策としては、①整流器の高効率化、②配電盤リレーの常時非付勢化、③機器操作箱の密閉化によるヒータの省略および最適運用、④屋外照明の2段階制御および照明灯の高効率化等がある。

3.6. 変電所における発生損失の有効利用

以上に変電所の各機器の損失低減策を述べたが、送変電設備における省エネルギーという観点からは、各機器の損失を低減させると共に、この発生損失を有効に利用することが重要である。

変電機器よりの排熱は温度が30℃～60℃と低いことおよび運転時間が季節的に変動する等の利用上の問題点はあるが下記諸方策によりその有効利用を図るべきである。

(1) 高効率熱回収技術の開発

交換熱量の大きいコンパクトで低コストな熱回収装置の開発

(2) 高密度蓄熱装置の開発

コンパクトで熱容量の大きい蓄熱槽の開発あるいは化学反応等を利用した新しい蓄熱方法の開発

(3) 利用分野の拡大

現在は主として給湯、冷暖房に利用されているがたとえば変圧器の排熱をケーブルの冷却に利用するシステムの如く、排熱特性に合った活用分野を拡大することが必要である。

4. 送変電設備における省エネルギーのための将来技術

前項までで現状の送変電設備における損失低減策を述べたが、これ等設備の将来技術であるUHV交流送電、UHV直流送電および大容量地中送電における省エネルギー効果についても一言つけ加える。

4.1. UHV交流送電

表3は送電電力10GW、送電距離600kmのモデル系統において送電電圧を500kVおよび1,000kV級UHVとした場合の省エネルギー効果を比較したものである。

500kV送電の場合には10GWの電力を送電するために1ルート当たり2回線として7ルート必要であるが

表3 UHV交流送電における省エネルギー効果

(送電電力10GW 送電距離600kmの場合)

送電電圧(kV)	500	1000kV級UHV
送電損失(MW)	600(100)	250(42)
送電線損失(%)	89	59
変圧器損失(%)	10	24
分路リアクトル(%) コンデンサ損失	1	17
送電線ルート	2回線/ルート・7ルート	2回線/ルート・2ルート

()内比率(%)

1,000 kV 級 UHV 送電では 1 ルート当り 2 回線で 2 ルートで可能となり送電損失も 500 kV 送電の場合の約 40% に低減される。

なお 500 kV 送電と UHV 送電とでは送電損失の構成比が異なり、後者では変電機器による損失比率が前者より高くなっているがこれは高電圧化により送電線損失が大巾に低減しているのに比して変圧器、分路リアクトルの損失が余り変らぬためである。

4.2. UHV 直流送電

前項の UHV 交流送電と同じく送電電力 10 GW, 送電距離 600 km の系統において ± 500 kV の直流送電を行うと送電損失は 1 ルート、双極 2 回線、810 mm² 6 導体の送電線を用いた場合で約 680 MW 程度となりその内訳は送電線路が約 70%, 交直変換設備が残り 30% となっている。

これら損失の主な低減策について簡単に述べる。

(1) 送電線路

UHV 直流送電における最も経済的な導体数は電力原価によって異なるが、上述の 10 GW, 600 km, ± 500 kV のモデル系統では電力原価が 15 円/kWh 程度であれば 6 導体といわれており電力原価が上昇するにつれて経済的導体数は大きくなる。

(2) 交直変換設備

交直変換設備の損失は大別するとサイリスタバルブ、変換器用変圧器、直流リアクトル他による損失から成っておりそれぞれ約 1/3 となっている。

サイリスタバルブの主な損失低減策としては、①サイリスタバルブの損失の 40% を占める素子の順電圧効果を改善するため素子の直列数の低減と電圧設計倍数の低減を図る、②冷却用補機の損失を低減すべく風冷より水冷に変える、③素子容量を増大することにより使用素子数を低減し陽極リアクトルの損失を低減する等がある。

変換器用変圧器、直流リアクトルの損失低減策としては高調波による漂遊損の低減をはかる。

(3) 交流フィルタ、調相設備等用コンデンサ

現在コンデンサのプラスチックフィルム化が進んでおり近い将来にオールフィルム化されるとコンデンサの誘電体損が大巾に低減され、従ってコンデンサの低損失化、縮小化が図られると考えられる。

4.3. 大容量地中送電

将来都心部での電力需要がさらに過密集中化した場合、送電ルート取得の困難性を考えると大容量の地中送電の必要性が大巾に増加していくものと思われる。

現状では地中送電線の損失低減策の項で述べた如き直接水冷却方式、或は洞道トラフ内間接冷却方式を行っているが、さらに送電容量が増えた場合導体内部油冷却方式、管路気中送電等が必要となってくる。

また将来技術としては極低温ケーブル、特に LNG の冷熱を利用したもの、さらには超電導ケーブルがありこれらの実用化により大巾な損失低減が図られるものと考えられる。

5. むすび

省エネルギーの問題は今や世界的な広がりを持って全ゆる分野で深く検討されているが本稿では電力システムの中の送・変電設備においていかなる損失があり、この損失低減のために如何なる方策が講じられているかという観点から省エネルギーの考察を行った。

紙面の関係で詳細な数値的データを割愛し概論を述べたが、本問題については昭和 56 年 2 月 19 日に社団法人電気協同研究会主催により「電力輸送部門の省エネルギー」と題して座談会が開催され関係各界の専門家により詳しい討論がなされ、その内容が報告書として同年 9 月電気協同研究第 37 巻第 2 号にて出版されているので御参照、御活用いただきたい。

参考文献

- 1) 電気協同研究会, 電気協同研, 第 37 巻第 2 号
- 2) 日立評論, Vol. 62 No. 10 1980-10 p. 51-56

