

世界各國의 送電電壓推移 및 그 技術特性

박종근*·김정부**·민석원***

(*서울대 공대 전기공학과 부교수,

한전기술연구원 책임연구원, *동 연구원)

1. 序 論

1879년 Edison이 전등을 발명하여 전기를 사용한 이래 全世界적으로 電力系統 개발의 趨勢는 지속적인 經濟伸長에 따른 電力需要 증가에 대비하여 電源의 大容量化 및 用地 取得難 등으로부터 근래에는 線路當 送電容量을 증대시키지 않으면 안되는 상황에 있다. 그러기 위해서 송전계통은 超高壓(Extra High Voltage) 및 UHV(Ultra High Voltage)로 되어가고 있다. 여기서 전세계적인 送電電壓의 格上推移 및 그 技術 특성과 아울러 우리나라의 경우에 대하여도 考察하여 보기로 한다.

먼저 超高壓(EHV) 및 UHV의 電壓의 구분을 調査하여 보면 다음과 같다. 미국 IEEE(Institute of Electrical and Electronic Engineers)에 의하면 242-800KV 범위전압을 超高壓(EHV)라 하고 800-2,000KV 범위전압을 UHV라 하고 일본의 中央電力研究所는 750-2,000KV를 超超高壓(UHV)라 하고 있다. 이와같이 750-800KV의 電壓呼稱은 미국과 일본이 서로 다르다. 이는 일본이 500KV 초고압 계통을 운전하기 때문에 그 이상 계통을 超超高壓(UHV)으로 본다고 생각된다. 그러나 이 범위의 전압을 개발한 나라에서 부르는 명칭인 초고압(EHV)이라고 하는 것이 타당하다고 본다. 다만 345KV, 500KV의 超高壓계통전압과 구분하기 위하여 여기서 750-800KV 전압을 極高壓(가칭)이라고 부르는 것이 좋지 않을까 사료된다.

2. 세계 각국의 送電電壓 推移

세계 각국의 송전계통 개발과정을 보면 1920년대에 미국에서 220KV 계통을 嚆矢로 300KV급(345-400KV) 超高壓 系統이 1950년대 초에 미국과 Sweden에서 각각 개발되었고 500KV 초고압 계통은 1950년대 중기에 소련에서 처음 개발되었고 미국도 곧 500KV 계통을 운전하였다.

그후 유럽계통은 400KV로 連繫로 되고 남미의 Benezuela, 아프리카의 남아연방 등도 400KV 계통을 導入하였다. 1960년대 중기이후에 700KV급(700KV-765KV) 超高壓(EHV) 계통이 캐나다, 소련, 폴란드 및 미국에서 개발되어 초고압(EHV) 전압의 實用化를 완성하였다. 일본의 경우를 보면 1950년대 초에 275KV 전압을 도입하였고 1973년에는 500KV 계통을 운전하여 아시아에서 처음으로 제일 높은 超高壓電壓 계통을 보유하게 되었다.

우리나라는 대만에 이어 아시아권에서 세번째 초고압 보유국으로 1976년 154KV 계통 운전 41년만에 345KV를 導入 運轉하였다. 그 당시 138KV나 154KV 계통은 345KV로 格上시키고 250-275KV 계통은 500KV로 격상하는 것이 통례이었다. 그후 1980년대 인도네시아, 필리핀, 중국, 태국이 500KV 계통을 도입하였다. 1980년도 후반에 와서 소련이 최초로 1150KV UHV 送電線을 개발하여 운전하였고, 남미의 Brazil, Venezuela, 남아연방공화국이 765KV 계통을 도입하였으며 일본 東京電力은 1000KV 송전선

250km 중 140km를 건설하기 시작하였다.

이밖에 商業運轉을 하고 있지 않으나 UHV계통(1000KV-1500KV)를 마쳤거나 연구중인 電力會社는 이태리의 ENEL(Ente Nazionale Per l'Energia Electrica), 미국의 BPA(Bonneville Power Administration), AEP(American Electric Power), 캐나다의 IREQ(Institute de Recherche d'Hydro-Quebec)등이다.

3. 주요 전력회사의 系統電壓 格上 背景

다음은 우리의 관심이 깊고 入手된 資料에 의해서 765KV와 1000KV계통을 개발 또는 도입한 전력회사들의 背景를 살펴보기로 한다.

3.1 미국 AEP

AEP의 765KV 送電方式 검토당시인 1967년도 最大負荷는 8,600MW, 年間 發電量은 500억 KWH, 總發電設備는 9,400MW이었으며 송전계통은 2000 C-mile의 345KV, 6000 C-mile의 138KV 계통으로 구성되었고 인접전력사의 송전계통과 4,000-5,000 MW상당의 連繫能力을 갖고 있었다. 또한 당시 전력 수요는 80년대말 20,000MW, 90년대말 35,000 MW로 전망되었고 발전기용량은 경제성 提高를 위하여 800-1,300MW로 채택키로 하였다. 그리고 토지수요의 증가와 公害問題로 發電所 부족 현상이 생겨 발전소규모의 增大化가 促進되어 1973년 이후에는 4,000MW급 발전소의 건설이 계획되었다. 따라서 AFP는 이와 같은 계통전망에 대비하고 電力供給 信賴度의 향상을 위해서 10-20년 후의 송전계통 개발에 대하여 검토를 시작하였다.

즉 기존 345KV 送電系統의 擴張과 上位電壓인 765KV 송전계통을 도입 기존 345KV 계통에 重疊시키는 두개방안을 대상으로 電力潮流 및 系統安定度를 검토하였는데 그 결과 기존 345KV 송전방식은 1990년도에 필요한 송전용량을 충족시킬 수 없을 뿐만 아니라 1980년에 필요한 송전용량을 감당하기 어렵다고 판명되었다. 또한 345KV 송전계통의 확장으로는 送電線 回線數와 變電所의 過多化로 토지의

효율적인 이용과 環境障害 改善을 이룩할 수 없어서 765KV 送電方式을 採擇하여 기존 345KV 송전계통을 중첩시키기로 하였다. 그리고 765KV 계통은 실제로 필요한 시기보다 앞서 운전되도록 하고 運轉初期의 負荷는 定格의 20-25% 정도로 하였다.

이 전압을 選定한 것은 두가지 이유였다.

첫째, 그 당시 技術的으로 送電可能이 증명된 最高電壓으로 판명되었고 필요한 각종 기종도 제작될 수 있었다. 둘째로 765KV 1回線은 345KV 5回線의 送電能力에 있어서 經濟性이 높게 評價되고 있기 때문이었다. 765KV 송전선의 送電費는 2,000MW전력을 160km 이상 송전시는 765KV가 345KV에 비하여 경제적이며 765KV 送變電 機器에 대한 KW당 건설비를 보면 345KV에 비하여 50% 정도였다. 초기 운전을 보면 765KV의 變壓器는 리액턴스가 높기 때문에 全電力의 2/3가 기존 345KV 계통을 통해서 흘렀다.

3.2 남아프리카 공화국

남아프리카 공화국은 1958년 275KV로 132KV 電力系統을 補強하였으며 1966년에 400KV을 운전하였고 1975년 全地域을 相互 連繫하였다. 그리고 1988년 434km 765KV 1회선을 알파變電所에서 베타變電所까지 400KV 1회선과 병렬로 운전하였다. GIS변전소는 각각 B.B.C와 Toshiba에서 도입하였고, 碍子, 철구류는 자체에서 생산하였다. 제2送電線은 1992년에 竣工될 것이다. 남아프리카 공화국의 주된 基底負荷用 發電所는 內陸의 石炭 생산지에 위치하고 있다. 중요한 負荷가 海岸가에 중심을 두고 있으며 그중 몇몇 부하는 內陸發電所로부터 1,500km거리에 있다. 이들 負荷 中心地에 電力을 공급하기 위해 남아프리카 공화국은 3개 루트의 400KV 송전선을 이용하고 있었다. 그러나 負荷가 10%씩 增加하여 7년마다 두배로 된다면 400KV 선로수를 2배로 해야 하거나 送電電壓을 格上해야 하게 되었다.

두번째 요소로는 주된 基底負荷用 石炭 發電所를 단위 發電機 定格이 600MW인 발전기를 6개 이용하는 것으로 標準化한 것이다. 이들 發電所와 負荷간 거리는 330-500km로 平均 400km 거리이다. 1970년대 말에 어떤 전압을 이용할 것인가에 대한 문제가 고

려될 때 이 連結線의 負荷는 송전선 건설이 完了되
는 1995년 쯤 2,000MW에서 4,000MW에 이를 것으
로 豫상되었다.

送電線路와 變電設備의 감가상각 分析을 통해 400
km거리에서는 765KV 2회선이 2,300MW에서 6,500
MW사이의 電力 수송용으로는 多回線 400KV 系統
또는 2回線 1,100KV 系統보다 더 經濟的으로 評價
하였다. 1976년 H.B.Norman은 “남아연방에서 高壓
送電線”이라는 논문에서 200km가 넘는 거리이고 부
하가 약 2,300MW 넘을 경우 765KV가 400KV보다
더 經濟적이라고 하였다. 765KV 送電線 建設費는
400KV의 송전선의 2배 미만이고 送電能力은 400KV
송전선의 4배이다. 이 豫언이 실행되었다. 불행이도
變電機器의 가격상승으로 765KV 系統 擴張을 더디
게 하고 있을 뿐이다.

3.3 일본 東京電力

1980년 일본의 1,100KV 系統電壓 格上을 UHV
送電 特別委員會에서 결정하였다. 同 委員會는
UHV 送電電壓으로 800KV, 1,000KV, 1,200KV,
1,500KV를 검토의 대상으로 選定, 기술, 環境面,
經濟性, 信賴性, 海外動向의 여러방면에 걸쳐서 면
밀한 調査研究를 행하여 比較, 對照하였다.

東京電力이 1900년 初에 下北半島의 한쪽에 1,000
만 KW의 大規模 立地點부터 600km를 橫斷하여 전
력을 需要地에 送電하는 경우를 想定 그 Model을
比較검토 하였다. 그 결과

① 送電線은 어느 電壓에도 設計 建設이 가능하지
만 絶線設計 등은 實用化上의 문제가 많고 建設工
法, 環境對策 등의 면으로 볼때 1,000KV가 1,200
KV보다 유리하다.

② 變壓器의 輸送, Bushing의 耐震性등의 면으로
볼때 1,000KV가 1,200KV보다 유리하고 1,500KV의
기기의 개발에는 長期間이 필요하다.

③ 環境面으로 볼때 占有空間은 1,000KV가 최소
이고

④ 建設工事費는 1,000KV가 최소이고

⑤ 機器의 해외 시장면에서는 765KV는 輸出實績
이 있고 1,000KV나 1,200KV는 수출면에서는 차이
가 없다.

1,000KV는 公稱電壓이고 이는 最大 許容電壓은

1,100이다. 그러나 東京電力의 UHV 실제 송전선의
건설은 東海의 栢崎刈羽 原子力 發電所(總 發電容量
5,500Mw)부터 關東 西部地域에 전력을 공급하는
1,000KV 설계 송전선 건설을 계획하고 있다. 巨長
250Km 전 루트중 首都圈에 가까운 群馬山梨 幹線
約 140Km가 88년에 着工되었다. 왜 1,000KV로 건
설하고 있는가 背景은 다음과 같다. 동시의 電力需
要는 年平均 1,000Mw정도의 伸長을 하고 있다. 新
潟群馬 幹線 및 群馬山梨 幹線은 1990년대 初까지
栢崎刈羽 發電所의 電源增強에 대응 既設의 新棒名
線, 新新사 幹線의 루트 多樣化의 역할을 담당하지
만 1995년 이후 電源의 增大, 전원의 強化를 고려하면
送電容量을 증가시키기 위해서 新設 루트가 필요하다.

그런데 送電線 經過地의 確保는 立地 및 環境面
에서 制約이 해마다 엄격해지고 있기 때문에 需要增大
에 對應해서 별개의 經過地를 新設하는 것은 아주
곤란하다. 東京電力은 2개의 幹線에 대하여는 將來
需要의 증가를 보아서 當初부터 1,000KV로 設計하
는 것으로 결정하였다. 이것이 建設 費用面에서 有
利하다고 판단되고 있다. 물론 필요에 응해서 電線
을 교체하는 방법도 있지만은 支持物을 當初부터
1,000KV하고 途中에 애자와 전선을 500KV에서
1000KV용으로 바꾸는 것에 대하여는 다음과 같은
이유로써 利得이 아니라고 判斷하고 있다.

- ① 1回線 運轉狀況에서의 工事用地 確保가 어려운
개소가 있다.
- ② 1回線의 停止工事로, 500KV에 接近할 시 誘導
等の 作業安全의 確保가 어렵다.
- ③ 施工期間이 2년 및 長期 停止로 되기 때문에
만일의 사고발생을 고려하면 基幹 系統의
Security 確保上 좋지 않다.
- ④ 荷重履歷, 架線後 運轉期間이 다른 電線과 새
로운 電線弛度의 整合을 圖謀하는 것이 施工上
어렵다. 다시 말하면 施工安全, 기술, 安定 供
給의 어느면으로부터도 現實的으로 施行하기
어렵다.

이러한 理由부터 필요시기에 1,000KV 架線을 實
施하는 일은 當初부터 1,000KV를 하는 경우와 比較
하면 建設費도 3배정도 높게 되어 經濟性으로 부터
도 새로운 500KV 經過地 線路에 UHV 設計를 적용
하였다. 이 2개의 송전선이 1,000KV로 昇壓하는 것

은 2000년 이후로 豫想되고 있다.

3.4 韓電의 경우

이상 3개의 電力會社의 格上背景을 살펴보았다. 그중 用地 確保面에서 比較하면 東京電力과 비슷하고 送電容量을 考慮하면 AEP나 ESCOM과 비슷한 것 같다. 현재 여기에 대해서 韓電, 研究所, 學界가 共同으로 線密한 검토를 하고 있지만 오래전 부터 送電線 經過地 選定, 發電所 施設容量 增大, 地域間 融通電力의 增大로 보면 電力最大 需要가 25,000 MW되는 1990년대 下半期에 765KV 超高壓 系統 導入이 豫想되어 이에 대한 電氣環境障害, 絕緣設計를 研究하여 왔으며 1990년도 上半期 안에 系統電壓 결정이 될 것이다.

4. 기술 特性

765KV, 1,000KV 系統 絕緣設計에 대하여 調査하여 보기로 한다. 이 設計上 주요한 점은 電氣環境障害를 考慮한 系統絕緣 및 機器의 絕緣 BIL이다.

4.1 미국 AFP 電力會社

4.1.1 電線設計

AFP는 1947년 이래로 Tidd Project로부터 RI (Radio Interference) 및 Corona-損失 經驗을 얻었고 나중에 345KV 運轉이 765KV 線路設計에 가장 有用하였다. Apple Grove 750KV 試驗研究 事業은 765KV 運轉電壓에 아주 가까운 電壓에서의 RI와 Corona에 대한 Data를 提供하여 주었다.

처음 765KV Project는 345KV 線路 2導體 標準電線인 ACSR 954MCM 4導體로 하였는데 그후 事業은 騒音이 問題가 되어 騒音基準을 55 dB(A)로 잡아서 Dipper로 바꾸었다. 電線 最大張力은 345KV 線路에서와 같이 10,800Pound로 하였으며 架空地線으로는 3/8 inch 7 No.8 Alumoweld를 사용하였으며 電線弛度의 75%로 하였으며 最大張力은 6,400 Pound이다.

4.1.2 絕緣設計

懸垂碍子連에서는 標準碍子(5 3/4"×10")인 경우

V연 가운데 상일 경우 32개 碍子를 使用하였고 50,000파운드(11 1/2"×6 1/8")인 경우 中央相은 30개 바깥相은 28개 使用하였으며 耐張 碍子連일 경우 36,000인 경우 連當 34개를 使用하여 4連을 使用하였으며 50,000파운드 경우 連當 32개를 使用하였다.

4.1.3 鐵塔 設計

AEP ANACOM(Analog Computer)을 사용, 여러가지 系統電壓을 解析하였다. 線路가 故障이 낮을 때 最大 Reenergizing 過渡電壓이 2.0P.U가 되어 이를 基準으로 空氣 絕緣距離를 定하였다. 中央相인 경우 垂直 空氣絕緣距離는 18피트(549cm) 水平 空氣絕緣距離는 16피트(488cm)로 하였다.

4.1.4 變電機器 設計

變壓器 BIL(Basic Impulse Insulation Level)은 2050KV이고 遮斷器는 2300KV이다. 避雷器의 定格은 585KV이다.

4.1.5 送電線 運轉實績

AEP는 1969년부터 765KV送電線 系統을 運轉한 이래 1982년 까지의 送電線路 事故實績은 0.4회/100 km Year이다. 이는 우리나라 345KV 送電線路의 事故實績과 비슷하다.

4.2 남아연방

4.2.1 電線 設計

남아연방은 海拔이 높기 때문에 超高壓(EHV) 送電線의 唯一한 問題는 코로나와 絕緣設計인 것을 처음부터 알고 있었다. 結果적으로 이태리의 研究機關인 CESI(Italian Electrotechnical Experimental Center)와 공동으로 높은 海拔 地帶의 空氣密度가 희박한데 관련된 電磁界와 絕緣問題를 연구하였다. 1979년 765KV 事業을 시작해서 原計劃으로는 1985년 竣工을 하려고 하였으나 技術적으로 解決되지 않는 事項이 많아서 3년간 연기되었다. 機器의 國産化, 國內 專門家 養成이 先決問題였다. 처음의 Spacer-Damper일부를 제외하고는 모든 資材가 國産化되었다.

ESCOM은 미국 專門家를 招請하여 構造物, 金具類, 機器등의 仕様, 設計 및 試驗의 諮問을 받았다.

海拔 1580m에 CESI와 같은 圓形 Cage를 만들어서 시험을 하였다. 相當 導體는 54/7/3.18mm(直徑28.62mm)인 ACSR Zebra 6導體, 正 6角形 配列이 選定되었다. 電線束의 直徑은 640mm로 定하였다. 可聽騒音 基準는 53.3 dB(A)로 定하였고 라디오 雜音은 0.5 MHz에서 72 dB로 豫想하였다.

最大許容 電界는 地上 1.8m에서 10KV/m로 定하였고 10년후의 電線 Creep를 고려하고 70°C에서 地上高는 15m로 하고 構造物과의 離隔距離는 10m 다른 電線과의 距離는 7.5m로 定하였다.

4.2.2 絶縁설계

鐵塔구조물을 海拔 1530m인 Apollo에 세워서 雷 開閉충격과 시험을 行하였다. 이 結果 絶縁공기 絶縁거리는 5.5m가 適當할 것이라 알려주었다. 實規模 구조물인 自立式 구조물과 地線을 懸垂絶縁을 다시 시험 해 본 結果 공기絶縁로를 지선 맨 絶縁에서는 5.2m까지 줄었다. 相間거리는 2m 줄었다. 애자개수는 300KN(195mm×320mm)애자를 33개 사용하였다.

4.2.3 支持物 設計

설계 平均 風速 32m/sec, 순간풍속 45m/sec로 설계하였다. 지지물 荷重은 鐵塔型別로 표1과 같다.

표 1. 絶縁形별 지지물 하중

地線 맨V형 현수絶縁	16 ton
直線絶縁	24.3 ton
耐張絶縁	55.8 ton
引留絶縁	68.9 ton
평 균	39 ton/km

4.2.4 變電機器

海拔 1,600m에서 ESCOM은 在來式 空氣絶縁 變電所는 1,000KV 정도 정격의 絶縁을 要하기 때문에 GIS쪽을 택하여 α 변전소의 GIS는 유럽BBC가 β 변전소는 Toshiba가 납품하였다. GIS내부絶縁은 2,100KV, 외부絶縁은 2,400KV, 변압기와 分路 Reactor는 1,950KV로 설계하였다.

4.3 일본 東京電力

4.3.1 電線設計

일본 동경전력의 1,000KV 설치는 1루트 2회선으로 하여 처음에 810mm²전선 10導體로 설계하였다. Agaki시험설계를 건설, 시험한 結果 810mm² 전선 8도체를 最終으로 選定하였다. 이렇게 素導體 數를 줄임으로써 송전선 공사비를 전체적으로 8% 節減할 수 있었다. 可聽騒音에 대한 설계기준은 50dB(A)이 하로 하도록 하였다.

4.3.2 絶縁設計

가스 絶縁개폐장치, 分路리액터의 BIL은 2,100, 2,240, 2,550KV의 4가지로 고려하고 있으며 변압기는 1,950, 2,100, 2,250, 2,400KV 4가지로 고려하고 있다. 開閉장치에 대해서는 C특성 避雷器와 遮斷器의 抵抗注入방식(抵抗値 500Ω정도)과 병용하면 1.6P.U로 억제할 수 있다.

汚損 耐電壓 목표치는 1선地絡時 健全相 過電壓을 1.2P.U로 하였다. 오손구분은 일반지역, 想定최대 鹽分附着 密度 0.03mg/cm²을 경오손지구, 0.12mg/cm²을 중오손지구로 구분하였다.

海拔 1,000미터 이하에서 도체, 絶縁간 공기絶縁거리는 5.93m로 하였다. 이는 옥외 충격전압 발생장치와 실규모 지지물을 模擬한 시험결과에서 얻은 값이다.

4.4 韓電의 경우

한전 기술연구원은 앞으로 765KV 2회선이 한전의 格上電壓이라고 보고 여기에 대한 환경장해에 대한 도체설계 및 絶縁설계를 1984년부터 전기연구소 및 국내 제작회사와 공동으로 연구를 하고 있다. 상세한 내용은 다음 기회에 발표하기로 하고 여기서는 중요한 몇가지만 소개하기로 한다.

4.4.1 도체 선정

可聽 騒音基準는 50dB(A)로 보고 ACSR Rail(483mm) 6도체로 잠정 선정하였고 2단계 실규모 시험결과를 建設하여 더 연구할 계획이다.

4.4.2 절연설계

70% 선로 充電을 보상하는 分路리액터를 설치하고 차단기 투입저항 450으로 할시 개폐과전압을 2.0 P.U로 억제할 수 있다는 것을 ANACOM과 EMTP 분석을 통하여 알 수 있었다. 공기절연 거리는 일본 중앙전력에서 개발한 시험식을 사용하고 개폐써지 배수를 2.0P.U로 보았을시 도체-탑체간 거리는 5.25 m이나 앞으로 시험을 하며 더 줄일 수 있을 것이다.

애자런 개수는 현수애자런에서는 300KN애자(195 mm×300mm) 33개가 소요되었다. Arcing Horn을 사용하여 Horn능률을 80%로 하였다. 내장애자는 400 KN(205×340mm)애자 272개가 소요되었다. 철탑높이는 현수일 경우 41m를 표준으로 하고 중량은 약 52 ton이었다.

5. 結 論

이상 각 나라 계통전압의 格上背景 및 技術特性을 비교, 조사 하였다.

우리나라 경우 電源地와 負荷地간 거리, 輸送容量, 地形, 地上高等을 고려할 때 2000년에는 현재의 345KV 계통을 격상하여 운전하여야 한다고 생각되며 여기에 대한 結論은 1990년도 상반기 안으로 내리라고 보고 있다. 계통전압이 確定되더라도 設計,

建設하는데 상당한 時間이 걸린다. 여기에 現在의 技術로는 어떠한 電壓, 어떤 環境이라도 여기에 맞는 設計, 建設이 可能하다.

다만 얼마만큼 經濟的이면서 信賴性있고 國產化하는 것이 問題이므로 여기에 國內 研究所, 學界, 製作會社가 協同으로 研究를 하여야 한다. 다행이도 1990년부터 實規模 試驗線路 建設에 의한 研究計劃이 있으므로 產·學·研이 共同으로 研究할 수 있는 좋은 機會가 되리라고 믿는다.

참 고 문 헌

- [1] G.S.Vassell, R.M.Maliszewski, "AEP 765-KV System: Sytem Planning Consideration," IEEE Pas Vol. Pas-88 PP 1320-1328, SEPT. 1969
- [2] 日本電力中央研究所 UHV 特別委員會 "UHV送電特別委員會 報告書," 1982
- [3] D.H.Cretchley, W.L.Esterhuizen, "Design and Construction of ESCOM's First 765KV Transmission Lines," CIGRE Conference on EHV Transmission System, October, 1987
- [4] 韓電技術研究院, "超高壓 送電에 관한 研究(v)," 1989
- [5] 日本 電氣新聞, "最初の UHV 送電建設의 準備着着," 1988.8.23.