

초고압 송전선로의 최적 격상전압 선정에 관한 연구-리비아국 사례

김봉희  
현대엔지니어링(주)

A STUDY ON OPTIMAL UPGRADING VOLTAGE OF EHV GRID NETWORK-LYBIAN CASE

BONG-HEE KIM  
HYUNDAI ENGINEERING CO., LTD.

**Abstract** -When a new transmission line is planned to construct, the system voltage and the conductor size of the transmission line should be decided by both economical and technical point of view. This paper presents a methodology to determine the optimal voltage for upgrading the transmission system voltage of existing the extra high voltage grid network by meeting the requirements of the transmission cost minimization as well as technical constraints of thermal limit and stability limit in the transmission line. As a case study, calculated are optimal voltages versus distance and capacity of a practically applicable transmission line with 4 bundles 2 circuits. By this study 400kV was selected as the next higher voltage for the existing 220kV Libyan grid network.

이다.

- t = 회선수
- n = 상단 개별도체의 수
- s = 개별 도체의 단면적 (sqmm)
- V = 線路의 전압 (kV)
- G = 접지선의 전체 단면적 (sqmm)

아래와 같은 가정하에서 좀더 실용적으로 사용할 수 있는 식을 구할 수 있다.  
즉, 접지선의 단면적이 최적화 계산과정에서 별로 영향을 주지 않으므로 접지선 費用을 무시하고, 상단 개별도체의 수가 일정하고 각 상별 전체 도체 단면적을 S로 표시할때, 전 회선의 km당 費用은 다음과 같다.

$$C_1 = A + B \cdot V + C \cdot S \tag{2}$$

여기서,  $S = n \cdot t \cdot s$   
 $B = b \cdot t$   
 $C = c$

2.2 損失費用

km당 損失費用은

$$C_{1s} = \frac{3\rho}{S} \cdot I_{max}^2 \cdot M \tag{3}$$

$P_{max}$  = 全 회선이 送電할 수 있는 최대電力 (MVA)

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{\sqrt{3} V} \times 1000$$

$$C_{1s} = \frac{3\rho}{S} \cdot \frac{P_{max}^2}{3V^2} \cdot M$$

$$= \frac{\rho}{S} \cdot \frac{P_{max}^2}{V^2} \cdot M$$

$$= \frac{D}{S} \cdot \frac{1}{V^2}$$

- V = 전압 (kV)
- $\rho$  = 상도체의 저항율 ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ )
- $I_{max}$  = 전체회선의 최대電流 (Ampere)
- S = 전체회선의 相導體의 총 단면적 ( $\text{mm}^2$ )
- M = 최대부하시 損失을 공급하기 위한 MW당 추가 發電費用
- D =  $\rho P_{max}^2 \cdot M$

여기서 損失費用은 자본비와 변동비를 포함한 장기 増分發電費用(long term marginal generation cost)의 평균치이다.

1. 서 론

한 국가에서 전력수요 증가를 예측하여 발전소 건설계획을 세우게 되며, 경제성이 있는 발전설비 규모를 구하다 보면 단위 발전설비 용량은 매우 커지게 된다. 이러한 대규모 발전설비를 건설할 때지를 전력수요지 근처에서 얻는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 전력생산지와 소비지 사이의 거리가 멀어지게 되어 지역간 전력수급의 불균형이 발생하며, 이 불균형을 해소하기 위하여 많은 송전설비가 건설되어야 한다.

신규로 송전설비를 건설하려면 우선적으로 송전전압을 결정하여야 한다. 송전용량에 따라 기존 최고 송전전압을 유지할 것이나 또는 전압을 격상할 것인가 하는 문제와 격상전압 무엇으로 할 것인가 하는 문제는 한 국가의 정치적 차원에서 결정하여야 할 중대한 사안이라 아니할 수 없다.

전압격상을 위한 시나리오는 1)기존 전압 送電線으로 확장하는 案, 2)지역간의 신설線路는 무조건 格上전압으로 건설하는 案, 3) 기존전압과 格上전압의 經濟性을 格上후보 線路별로 비교하여 經濟性이 유리한 구간만 格上하는 案과 4)수송電力이 대규모가 될 것으로 예상되어 기존전압으로 확장시 많은 경계지가 필요한 구간의 線路를 格上전압으로 건설하고 다른 후보선로는 경제성이 높은 구간에 대해서만 格上하는 案이 있다.

경제성을 검토하는 방법으로는 첫째, 電力계통의 두지점간 電力 流通量에 따른 경비를 여러 송전전압별로 비교해 보는 二点法 (2 point method)을 사용하여 송전거리, 송전전력이 변함에 따른 전압별 경제성 변화의 추세를 알아본 후, 둘째, 이 방법을 確定 후보선로 각각에 적용하여 全 계통확장의 경제성을 앞에서 언급된 시나리오별로 검토하는 것이 일반적이다.[2]

2. 최적 전압 계산

송전선로의 최적전압과 해당線路의 도체크기는 送電費用을 최소화하도록 구하는데, 送電費用은 송전선로와 관련 變電所 및 變壓器의 建設費用으로 구성되는 資本費用(capital cost)과 線路의 電力損失을 보상하고자 공급하는 發電費用(loss cost)으로 構成된다.[3]

2.1 송전선로 費用

송전선로의 費用은 일반적으로 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$C_1 = a + b \cdot t \cdot V + c \cdot n \cdot t \cdot s + d \cdot G \tag{1}$$

여기서, a, b, c, d는 여러가지 전압별, 導體別 線路 데이터에서 구해지는 상수

2.3 變電設備 費用

변압기의 費用은 정격용량과 고압측 捲線전압의 函數이다.

$$C_r = K \cdot P^a \cdot V^\beta \quad (4) \text{ 式}$$

$K, a, \beta$  상수값은 여러가지 다른 정격용량과 전압別 變壓器의 가격으로부터 계산할 수 있다. 하나의 전선으로부터 1차 송전선을 경유하여 2차 送電線 또는 배전선으로 電力을 공급하는데 있어서 각각의 전압을 대응시키기 위한 변압기가 적어도 하나는 필요하기 마련이다. 발전기용 승압변압기 費用은 공급모선의 送電費用에 포함된다.

기타 變電所 기기, 즉 모선, 차단기, 메타, 보호계전계통 등은 송전선로의 km당 費用에 거의 영향을 주지 않기 때문에 費用함수식에서 고려하지 않는다.

2.4 송전선로 總 費用

상기 (2), (3), (4)식에서 송전선로의 킬로미터당 費用은 다음과 같다.

$$C_L = A + B \cdot V + C \cdot S + \frac{D}{S} + \frac{E \cdot V^\beta}{V^2} \quad (5) \text{ 式}$$

여기서,  $D = \frac{\rho P_{max}^2 \cdot M}{K \cdot P_{max}}$   
 $E = \frac{L}{K}$

$K$  = 변압기 費用 常數  
 $L$  = 線路의 回線距離 (km)  
 $P_{max}$  = 全 回線의 最大送電電力 (MVA)

2.5 최적화 계산

상기 (5)로 주어진 送電費用의 最小費用은 단면적에 대한 미분치와 전압에 대한 미분치가 각각 零일때 구해진다.

$$\frac{\partial C_L}{\partial S} = C - \frac{D}{S^2} = 0 \quad (6) \text{ 式}$$

$$\frac{\partial C_L}{\partial V} = B - \frac{2D}{S V^3} + \frac{\beta E}{V^{1-\beta}} = 0 \quad (7) \text{ 式}$$

위와 같은 편미분방정식을 푸는 것은

$$\Delta C_L = \frac{\partial C_L}{\partial S} \cdot dS + \frac{\partial C_L}{\partial V} \cdot dV \quad (8) \text{ 式}$$

식의 영값을 구하는 것과 같다. 이와같은 식을 푸는 방법은  $S$ 와  $V$ 의 초기값을 가정하여 steepest descent method에 의해  $|\Delta C_L| < \epsilon$  ( $\epsilon$ : 희망하는 정확도, 0.001)이 될때까지 반복해서 계산하는 것이다. 본 연구에서는 최근 PC용 패키지인 MATLAB[5]을 사용하여 해를 구하였다.

2.6 사례연구

2.6.1 적용사례

기존 최대 송전전압이 220kV인 리비아 초고압 電力系統에서 차상위 送電전압 결정을 위한 사례연구를 수행하였다. 차상위 전압을 결정함에 있어 대상전압을 전 세계적으로 공칭 표준전압이 220kV, 275kV, 345kV, 400kV, 500kV, 765kV, 1000kV로 사용되고 있음을 감안하여 승압전압 가능대상으로 400kV와 500kV로 한정하였고, 송전선로의 건설비용을 계산하였다.

400kV급과 500kV급 송전선로의 주요사항은 표 2와 같으며, 철탑의 모양은 표준형 수직현가 2회선 철탑으로 하였다.

2.6.2 비용계수

표준 2회선 철탑에 대하여 사용한 계수는 아래와 같다.

$M$ (損失費用) ; 增分送電費用 4.5 cents/kWh으로 발전소 내용연수 25년동안 할인율 12%로 운전할 경우 kW당 발전원가 = 약 US\$2,000/kWh

$\alpha$  ; 변압기의 정격에 대한 지수계수 = 0.6724  
 $\beta$  ; 변압기의 전압에 대한 지수계수 = 0.9038  
 $\rho$  ; AAAC 도체의 저항율 = 40.8479 ohm.sqmm/km

2.6.3 최적 전압과 최적 도체단면적 계산

상기 2.5절의 최적화 계산 방법에 의해 送電전력(MVA)과 送電거리(km)의 변화에 따른 최적 送電전압(kV)과 도체단면적(sqmm)을 구하였으며 이를 표 3과 그림 1에 표시하였다. 이 그림에서 보는바와 같이 최적 送電전압과 최적 도체크기는 送電거리에는 거의 무관하며 送電전력에 비례함을 알 수 있다. 즉 최적전압과 최적 도체크기를 요약하면 100MVA 送電경우 172-174kV에 80-79 sqmm, 500MVA 送電경우 372 - 388kV에 185-177 sqmm, 1000MVA 送電경우 513-546kV에 269-253sqmm이다. 그러나 초고압 송전선로의 도체단면적은 코로나 損失이나 電流 容量, 安定度 限界와 같은 기술적 검토가 있는 뒤 실제 사용할 도체단면적을 결정하여야 한다.

2.6.4 送電容量

송전선로의 容量을 결정하는 때는 도체의 電流容量을 고려한 熱的限界(thermal limit)와 써지임피던스, 위상각차, 線路거리에 의한 安定度 限界를 고려하여야 한다. 상기 事例研究에서 다른 리비아 계통의 경우, 현재 사용 최고 전압인 220kV급 사용도체인 AAAC 413.5 sqmm, 2 bundle과 格上가능 대상 전압인 400kV와 500kV에서 사용가능한 AAAC 405 sqmm, 4 bundle에 대하여 熱的 限界와 安定度 限界를 계산하였으며 그림 2에 표시하였다.

(1) 熱的限界 (Thermal limit)

| 도체 규격                     | 電流容量              | 電流容量 安定度限界 |
|---------------------------|-------------------|------------|
| 220kV AAAC 2 x 413.5 sqmm | 1250 A ( 476 MVA) | 230 km     |
| 400kV AAAC 4 x 405 sqmm   | 2152 A (1490 MVA) | 300 km     |
| 500kV AAAC 4 x 405 sqmm   | 2152 A (1864 MVA) | 360 km     |

(2) 安定度 限界 (Stability limit)

두 지점간의 最大 送電電力( $P_{12}$ )는

$$P_{12} = \frac{V_1^2 \sin \theta_{12}}{Z_c \sin \beta l}$$

여기서,  $Z_c$  : surge impedance,  $\sqrt{L/C}$   
 $\beta$  : phase constant,  $\omega \sqrt{L/C}$   
 $l$  : line length

2.6.5 送電容量別 최적전압

기술적으로 채택가능한 線路의 도체를 AAAC 405 sqmm, 4 bundle로 가정하였을 경우 送電電力별 최적 전압을 구하면 그림 3과 같다. 이 그림에서 보는 바와 같이 송전전력이 200 MVA 내지 400 MVA 급일 경우 기존 220 kV 전압이 경제적이며, 800 MVA 내지 1000 MVA 급일 경우 400kV 전압이 次上位 格上전압으로 가장 經濟的이고 1000MVA를 초과할 경우는 500kV 전압이 가장 經濟的임을 알 수 있다. 리비아 계통의 경우 향후 20년간의 負荷豫測과 발전소 건설계획을 고려할 때 예상되는 2지점간의 最大 送電電力을 구하기 위하여 年度別 電力 潮流계산을 행하였으며, 이 결과 最大 送電電力이 1000MVA 이하므로 예상되므로 次上位 格上전압으로서 400 kV를 선정하였다.

### 3. 결 론

본 研究에서는 신규로 송전선로를 건설하고자 할 경우 가장 경제적인 송전전압과 送電線體 断面積을 결정하는 이론적 배경으로서 送電費用式의 최적화과정과 송전선로의 熱的限界와 安定度限界를 고려한 최적전압 결정방법을 제시하였다. 事例研究로서 리비아 초고압 전력계통의 次上位 전압결정을 위하여 현실적으로 적용가능한 4 線路體 2 回線 線路의 송전거리와 送電容量別 최적전압을 제시하였다. 이와같은 경제적, 기술적 研究結果에 의해 리비아國의 次上位 송전전압을 400 kV로 결정하였다.

本 論文에서 제시한 연구결과가 앞으로 新說하고자 하는 송전선로를 기존 使用 전압으로 유지하여야 할지, 또는 新規 전압으로 格上하여야 하는지와 같은 중요한 政策決定 수단으로 응용될 수 있게 되기를 기대한다.

(참 고 문 헌)

- [1] Bong-Hee Kim, Fathi M. Abuogarad, et al., A Study on the Voltage Selection for GECOL EHV Grid Network, July, 1993
- [2] 한국전력공사 전원계획처, 향후 대전력수송을 위한 장기계통 구성대책에 관한 연구(보고서 부록 II : 초고압 전압 격상의 경제성
- [3] 신중민, 전문가 시스템을 이용한 최적 장기 송전계획에 관한 연구, 박사학위 논문 1989. 6
- [4] William H. Press, et al., Numerical Recipes in C, 2nd edition, Cambridge University Press, 1992
- [5] Westinghouse Electric Corp., Electrical Transmission and Distribution Reference Book, 1978
- [6] The Math Works, Inc. 386-MATLAB for 80386 personal computers, 1989

| Description                     | 400kV T/L                   | 500kV T/L    |
|---------------------------------|-----------------------------|--------------|
| No. of suspension insulator     | 23                          | 30           |
| No. of tension insulator        | 28                          | 35           |
| No. of conductor per phase      | 4 bundle                    | 4 bundle     |
| Conductor type                  | AAAC                        | AAAC         |
| Conductor size (mmsq)           | 405                         | 405          |
| Stranding and wire dia.(no./mm) | Al 37/3.734                 | Al 37/3.734  |
| Ampacity                        | 538 A                       | 538A         |
| Tower type                      | Vertical 3ph double circuit | same as left |
| DC resis. at 20 deg C (ohm/km)  | 0.0826                      | 0.0826       |
| AC resistance(ohm/km)           | 0.0833                      | 0.0833       |
| Inductance (mH)                 | 0.82777                     | 0.86227      |
| Capacitance (micro F)           | 0.01363                     | 0.01308      |

표 1. 400kV와 500kV 송전선로의 주요사항

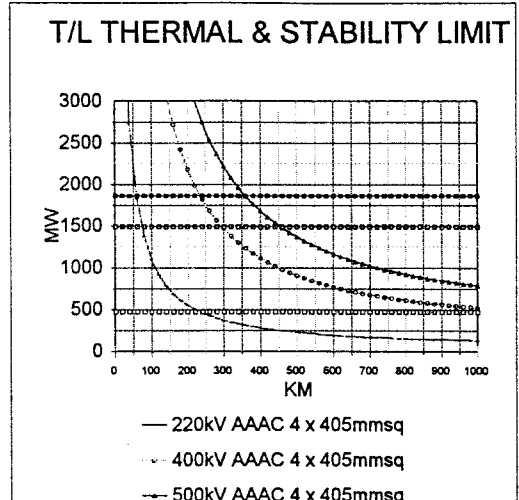


그림 2. 송전선의 열적한계와 안정도 한계

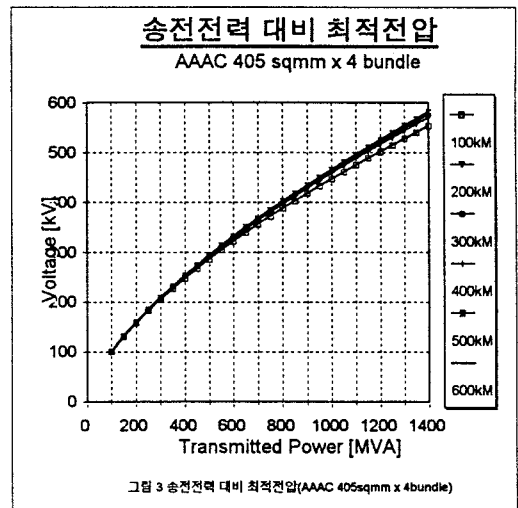


그림 3. 송전전력 대비 최적전압

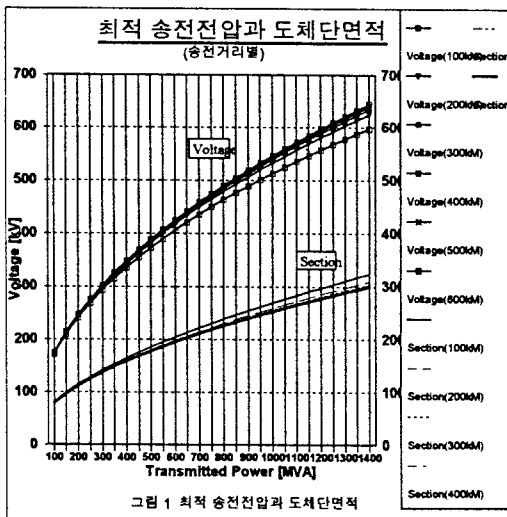


그림 1. 최적 송전전압과 도체단면적