

## 서부아프리카 국가간 연계 송전망 타당성 조사

김중화\*, 이철휴\*, 이영길\* **최상주\***,  
한국전력공사\*

### Feasibility Study for the Ghana-Mali 225kV Interconnection Project

Jong-Hwa Kim\*, Chul-Hyu Lee\*, Young-Gil Lee\* Sang-Ju Choi\*  
Korean Electric Power Corporation\*

**Abstract** - KEPCO conducted the project called the "Feasibility Study for the Han (Ghana) - Bobo Dioulasso (Burkina Faso) - Bamako (Mali) Interconnection Project" as its first African project. This paper deals with power system analysis and Transmission line and substation design of approximately 750 kilometers of the 225 kV single circuit transmission lines and six substations. The main contents of the power system analysis results and preliminary engineering design include power flow, transient stability, eigenvalue analysis, transmission line design, substation design and economic analysis.

#### 1. 서 론

한국전력공사는 2007년 7월 서부아프리카 전력공동체(WAPP)와 '가나-말리 225kV 송전망 타당성 조사사업'에 대한 계약을 체결하고 1년간에 걸쳐 사업을 수행하였다.

동 프로젝트는 국가간 송전망 연결 프로젝트로서 부르키나파소, 말리의 부족한 전력을 가나로부터 수송하기 위해 계획되었다. 한편은 이번 프로젝트에서 가나-말리간 225kV 연계송전망에 대한 타당성조사와 환경영향 평가 및 이주대책 등 2개 사업을 수행하였으며, 본 논문에서는 타당성조사에 대한 내용을 토대로 작성되었다. 본 송전망 건설 타당성조사사업은 기술적인 내용분석 즉 계통해석과 송변전 예비설계, 경제적 타당성 검토 및 기술이전 교육을 수행하였다.

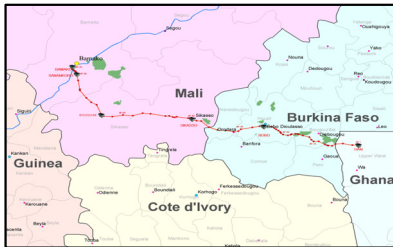
본 논문에서는 금번 타당성 조사에서 수행된 조류계산 및 안정도 검토 등의 계통해석과 송변전 설비 예비설계 그리고 경제성 분석결과에 대해 기술할 것이다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 서부아프리카 전력 개황

서부아프리카 전력공동체는 서부아프리카 내 국가들을 회원으로 하여 전력분야에 있어 주요 기반시설 개발을 위한 협력, 특히 국가간 연계선로 건설과 전력융통을 도모하기 위해 2000년 8월에 발족되었다. 이 단체는 20년간 4단계에 걸쳐 프로젝트를 계획하고 있으며 '가나-말리 225kV 송전망 타당성 조사사업'도 국가간 연계망 구축을 위한 준비단계 중 하나이다.

##### 2.2 사업의 개요



〈그림 1〉 사업 위치도

본 프로젝트는 송전선로 총 길이 742km (가나48/부르키나파소 298/말리395.9km), 신설 3개 및 기설 확장 3개 변전소를 포함한 사업으로서 전압은 225 kV로 결정하였다. 본 논문에서는 아래와 같은 업무에 대해 기술하였다.

- 1) 타당성 조사용 자료 수집 및 검토
- 2) 조류계산, 안정성 검토 등 계통 해석
- 3) 송전선로, 변전소, 통신설비 등 예비설계
- 4) 경제성 분석

##### 2.3 자료수집 및 검토

전력설비 자료 갱신, 계통 확장계획 검토, 계통 데이터베이스 구축 등을 위하여 3개국에 걸쳐 자료수집이 수행되었고, 현장조사를 통해서 취득할 수 없었던 자료에 대해서는 국제규격을 준용하였다.

##### 2.3.1 수요예측

지역별 전력수요 자료, 경제적 자료, 기존 연구 자료 등을 활용하였고 경제성장률이 앞선 인접국의 경제적 지표와 전력소비량의 탄력성 추이를 비교분석을 통해 예측을 시행하였다.

##### 〈표 1〉 3개국 최대수요

[단위 : MW]

연도	2007	2011	2015	2020	2026
가나	1,511	2,179	2,547	2,947	3,524
부르키나파소	131	170	217	294	414
말리	160	219	321	508	739

##### 2.3.2 장기전력설비 계통 계획 검토

현재 계획되어 있는 기존 계통 계획을 새로운 수요예측과 분석하여 검토하였다. 가나는 비교적 확장계획을 수립하였으나 부르키나파소와 말리는 아직 계통구성 자체가 미비한 상태이다. 계통최고전압은 각각 330kV와 225kV로 구성되었다.

##### 2.4 조류계산

2007년도 조류계산 결과를 기준으로 하여 2011, 2015, 2020, 2026년에 대한 조류계산이 시행되었다. 2011년 및 2015년에는 상정고장시(N-1)에도 안정적이었으나, 2020년과 2026년에는 다소 불안한 상태이다. 이는 수요 증가에 비해 전원개발 및 계통확장계획은 충분히 수립되지 않은 데서 비롯된다고 할 수 있다.

##### 2.4.1 2011년 조류계산

다음의 표는 2011년 3개국 간 융통되는 조류를 보여준다. 연계선로를 통하여 조류가 가나, 코트디부아르에서 부르키나파소, 말리로 보내지는 것을 알 수 있다.

##### 〈표 2〉 2011년 조류계산 결과

선로구간	유효전력[MW]	무효전력[Mvar]	부하율[%]
Han ~ Kodon	41.0	-2.4	14
Kodon ~ Sikasso	9.06	0.3	3
Bolga ~ Zagto	21.3	-31.5	7
Ferke ~ Kodon	35.7	-20.4	12
Ferke ~ Sikas	39.4	-23.7	13

##### 2.4.2 2015년 조류계산

2015년 조류계산 결과 기준치를 벗어나는 선로는 나타나지 않았다.

##### 〈표 3〉 2015년 조류계산 결과

선로구간	유효전력[MW]	무효전력[Mvar]	부하율[%]
Han ~ Kodon	59.0	-17.4	18
Kodon ~ Sikasso	26.1	1.8	8
Bolga ~ Zagto	42.2	-30.6	13
Ferke ~ Kodon	36.7	-24.7	11
Ferke ~ Sikas	49.6	-28.5	15

### 2.4.3 상정고장

조류계산 결과를 기준으로 송전선로, 발전기, 변압기 등 주요 설비 탈락시 계통 해석이 수행되었다. N-1 고장계산 결과 2개의 조건에서 계통이 붕괴되었고 단일 발전기 탈락 시 조류계산 결과는 수렴하였다.

〈표 4〉 N-1 고장계산

고장내역	발산/수렴	계산결과
Han ~ Kodon 선로 탈락	수렴	전압, 용량 이상없음
Koden ~ Sikas 선로 탈락	수렴	"
Sikas ~ Bougo 선로 탈락	수렴	"
Bougo ~ Sanan 선로 탈락	수렴	"
Sanan ~ Kodia 선로 탈락	수렴	"
Bolga ~ Zagto 선로 탈락	수렴	"
Ferke ~ Kodon 선로 탈락	수렴	"
Ferke ~ Sikas 선로 탈락	수렴	"
Koden ~ Pa 선로 탈락	수렴	"
Kodia ~ Kita 선로 탈락	발산	부하차단 (UVR 설치)
Kita ~ Manat 선로 탈락	발산	부하차단 (UVR 설치)
Akosomb 발전기 탈락	수렴	전압, 용량 이상없음
agré 발전기 탈락	수렴	"
Manatal 발전기 탈락	수렴	"

### 2.4.4 연계시스템 동등 한계

PSS/E 프로그램을 사용하여 2011년 정상상태 계산결과 부르키나파소, 말리는 각각 가나에서 97MW, 119MW까지 전력을 수입할 수 있었다. Kodia~Kita, Kita~Manat 구간 고장시 각각 45MW, 35MW의 부하차단이 필요한 것으로 나타났다.

### 2.4.5 단락전류 계산

330kV, 225kV, 161kV 계통망에 대한 단락전류 계산이 수행되었다. 3상 단락전류 계산결과 Akosombo 161kV 모선, Volta 330kV 모선에서 각각 21kA, 9.1kA의 값을 나타냈고 이 결과치로 근거로 31.5kA의 차단기 단락전류 정격이 충분하다는 것을 알 수 있다.

## 2.4 안정도 검토

### 2.4.1 과도안정도

고장상태에서 계통을 안정적으로 유지하기 위한 대책으로 주파수 제어 예비력, 고장대비 예비력, 주파수 저하시 자동 부하차단 등이 검토되었다. 검토결과 국가 내 계통보강, 225kV 신규 환상망 구성 등이 필요한 것으로 나타났고 2011년과 2015년에는 단일선로 탈락시 동기탈조 등 안정도 문제가 나타나지 않음을 알 수 있었다.

### 2.4.2 Eigenvalue 분석

Eigenvalue 분석은 2011년, 2015년을 대상으로 DSA(Powertech) 프로그램을 사용하여 수행하였으며 3개국의 발전기는 안정적이었으나, 코트디부아르의 발전기는 다소 불안한 것으로 분석되었다.

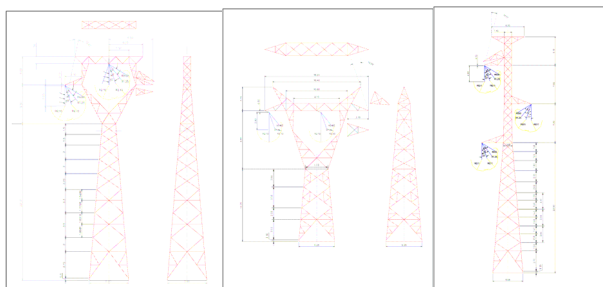
## 2.5 송전선로 예비설계

### 2.5.1 전선선형

이번 225kV 연계선로에 사용될 송전선로 선종을 결정함에 있어 송전 용량, 기계적강도, 코로나 및 해당국가의 기술기준 등을 고려하여 현재 해당지역 225kV 송전선로에 안정적으로 사용되고 있는 AAAC (All Aluminum Alloyed Conductor) ASTER 570 (340MVA) 을 권고하였다.

### 2.5.2 철탑설계

철탑설계시 3개국 및 인근국가에 적용된 철탑형상을 참고로 하였고 전선배열, 절연거리, 경제성 등을 고려하여 철탑형상을 결정하였다. 그 결과 1회선 산형강 철탑이 선정되었고 철탑의 형상은 아래와 같다.



〈그림 2〉 철탑 형상

### 2.5.3 애자설계

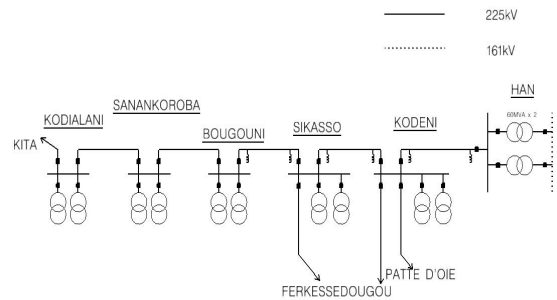
애자는 IEC 305 CLASS의 유리애자(U 160 BS)로 결정되었으며 애자 1련당 수량은 연면누설거리 방식에 의해 15개이다. 아킹혼 간격은 1,900mm로 사고율은 3.31/100km·year로 예측되었다.

### 2.5.4 기초설계

철탑기초 하중을 분석하여 기초형식을 결정하였다. 견고한 부지에는 독립기초, 연약부지에는 현장타설 말뚝기초를 권장하였으며 정확한 기초설계를 위해서는 지질조사 및 철탑형별에 따라 변경될 수 있음을 제시하였다.

## 2.5 변전소 예비설계

국가별 전력사의 변전소 운전, 보수기준을 바탕으로 소요기자재의 기술규격을 마련하였고 상호연계를 위한 설계기준을 수립하여 예비설계를 시행하였다. 이번 변전소 예비설계는 가나의 1개 변전소 신설, 말리의 3개 변전소 신설과 부르키나파소, 말리의 2개 변전소 증설로 구성되며 단선도는 아래와 같다.



〈그림 3〉 변전소 개요

### 2.5.1 설비규격

IEC 규격에 따라 설비규격을 선정하였고 각 국가별 유지보수 여건을 감안하여 경제적이면서 가장 적합한 규격을 선정할 수 있도록 하였다.

- 변압기 : IEC 60076
- 차단기 및 단로기 : IEC 62271
- CT 및 VT : IEC 60044
- 피뢰기 : IEC 60099

### 2.5.2 모선구성 방식

변전소 모선 구성방식은 장기적인 측면에서 신뢰성과 계통확장 계획 및 경제성을 비교 검토한 후 결정하였으며, 유연성 및 경제성 측면에서 모선방식은 이중모선에 1 CB 방식으로 검토되었다. 초기에는 단모선 방식으로 운영될 것이며 차후 신뢰성 향상을 위한 모선보강이 요구된다.

## 2.6 경제성분석

경제성분석은 경제적 타당성(EIRR), 재무적 타당성(FIRR), 비용분석(B/C ratio) 및 민감도 분석(sensitivity analysis) 등으로 이루어졌다. 검토조건은 할인율 (Discount rate) 12%, 산출기간 30년, 전력요금 kWh 당 가나 10.5센트, 부르키나파소 16.3센트, 말리 15.4센트 그리고 국가간 전력거래 가격을 7센트로 가정하였으며, 건설비용 및 경제성분석 조건 등은 2006년 기준으로 검토되었다. 경제적 내부수익률(EIRR) 결과 가나 39%, 부르키나파소 21%, 말리 15.7%로서 경제성 분석 결과에서는 타당성 있는 프로젝트로 판명되었다.

## 3. 결 론

본 사업은 3개국 연계 송전망에 대한 타당성 조사, 송변전 예비설계, 경제성분석 등을 완수함으로써 한전의 기술력을 국제적으로 인정받는 계기로 작용하였다. 또한 본 사업을 통하여 서부 아프리카 지역 진출의 교두보를 확보하였으며 향후 서부아프리카 시장 내 신규사업에 대한 진출을 용이하게 하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 한국전력공사, "Feasibility Study for the Ghana-Mali Interconnection Project", Feasibility Study Report, 2008