개성공단 전력수요 전망과 효율적 공급방안에 관한 연구

(power demands and effencient power supply method in kaesung industrial complex)

이 홍 기* · 이 상 중* · 양 성 덕**

(Hong-Gi Lee · Sang-Joong Lee · Seong-Deog yang)

* 서울산업대학교 대학원 전기공학과 · ** 고려대학교 수학과 교수

남북경협의 상징인 개성공단의 성공적인 개발은 남북간의 획기적인 관계 개선은 물론 고비용 저효율의 국내중소기업의활로개척에 효과적인 대안이라 볼 수 있다. 따라서 공단개발의 핵심 인프라인 전력공급설비의 효율적인 구축은 개성공단 확장개발에 중요한 변수로 작용할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 개성공단의 확장개발에 따른 예상전력수요를 산정하고 이를 개성공단에 공급 시 관련선로의 조류 및 전압, 고장시 전압 dynamics를 이용한 안정도분석 등을 통한 효율적인 공급방안을 제시하였다.

Abstract

This paper predicts the future power demands of Gaesung industrial complex. Power flow and voltage dynamics are shown and an efficient method for supplying the electric power to Gaesung industrial complex is proposed.

Key Words : Gaesung industrial complex, power demands, power flow

1. 서 론

개성공단 개발은 남한의 자본 및 기술과 북한의 토지 및 인력을 결합하여 고비용 구조에 따른 국내 중소기업의 활로개척과 북한경제난 해소에 도움을 주고자 북한개성지역에 공단을 조성하고 남북간 대규모 경제협력사업의 추진 및 남북경협을 통해 남북관계개선, 한반도의 긴장완화 및 평화분위기 조성 , 남북공동번영 촉진, 북한에 시장경제학습의 기회제공 등을 통한 남북통일을 앞당기는데 그 목적이 있다

개성공단은 2007년 12월말 토지조성 및 도로, 용수 및 폐수처리시설, 전력· 통신 등 중요기반 시설이 준공되었고, 1단계(330만㎡)부지의 완전 분양('07.6월)으로 본격적인 운영단계에 진입하였다

이러한 개성공단의 성공적인 개발추진에 힘입어 2007년 10월 남북정상 회담 시 개성공단 2단계를 확장개발하기로 합의하였다

따라서, 본 연구에서는 개성공단의 확장개발에 따른 예상전력수요를 산정하여, 관련선로의 조류 및 전압 안정성 검토, 고장시 전압 dynamics를 이용한 안정도 분석결과 등을 고려 기술적 측면에서 효율적인 전력공급방안을 제시하였다

2. 개성공단 전력인프라 구축 개요 및 전력수요 현황

가. 개성공단 전력분야 인프라 구축 개요

개성공단사업은 2000년 8월 현대아산과 북한과의 합의로 시작되었다. 남북경제협력추진위원회 제2차 회의(2002.08) 및 개성공단건설실무협의회 제1차 회의(2002.10)에서 합의에 따라 외부기반시설은 상업적 차원에서 건설을 추진하기로 결정하고, 이후 계속적인 남북 사업자간, 당국간 협의과정을 거쳐 2003년 6월 30일 1단계 330만㎡ 개발이 착수되었다. 전력인프라가 빈약한 북측 사정을 고려하여 2002년 8월 제2차 남북경제협력추진위원회에서 정부는 '개성공단 전력공급은 상업적 방식으로 추진' 하기로 북측과 합의하였다. 1단계 전기사업자로 지정된 한전은 적기 전력공급 방안을 마련하기 위해 수차례 정부 관계부처 회의를 거쳐 개성공단 시범단지는 배전선로로, 1단계는 송전방식으로 공급하기로 확정하고 2004년 12월 북측기관인 중앙특구개발지도총국과 「개성공업지구 전력공급에 관한 합의서」에 합의·서명하였다.

이에 따라 한전은 2005년 3월 16일부터 배전방식으로 문산변전소에서 개성공단 시범단지 입주기업에게 전력을 공급하게 되었다. 개성공단에 공급된 전력은 22.9kV 1만5천kW를 공급할 수 있는 규모로 남측의 전력을 휴전선을 넘어 최초로 북측에 공급했다는데 역사적 의미가 있다.

본격적으로 1단계 본 단지 입주기업의 전력공급을 위해서는 배전선로로는 공급능력이 부족하여 2006년 5월 송변전건설 및 운영에 관한 부속합의서를 체결하고 154kV 문산-평화 송전선로와 평화변전소를 건설, 2006년 12월 21일 분단이후 최초로 비무장지대 북측지역에서 남·북의 역사적인 송전선로를 연결하여 2007년 5월 26일 송전방식에 의한 상업운전을 개시하였다.

평화변전소		154kV 문산~평화 송전선로				
		북측구간		남측구간		
M.Tr	GIS	가공선로	철탑	가공선로	철탑	지중선로
45/60MVA 2BANK	170kV 5CCT 25.8kV 14CCT (7D/L)	2C-5.5 (km)	15 (기)	10.5 (km)	33 (기)	1.4 (km)

표 1. 개성공단 전력공급 송변전설비 현황 (1)

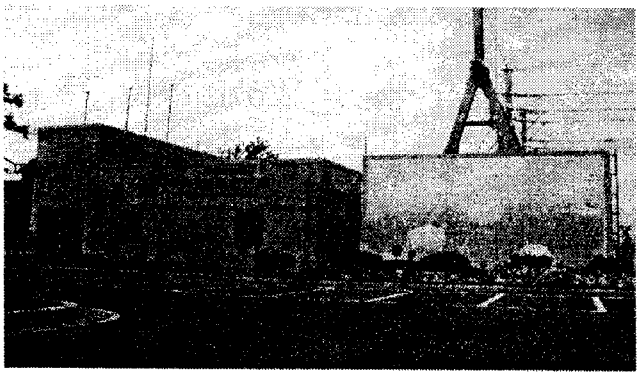

그림 1. 154kV 평화변전소 전경

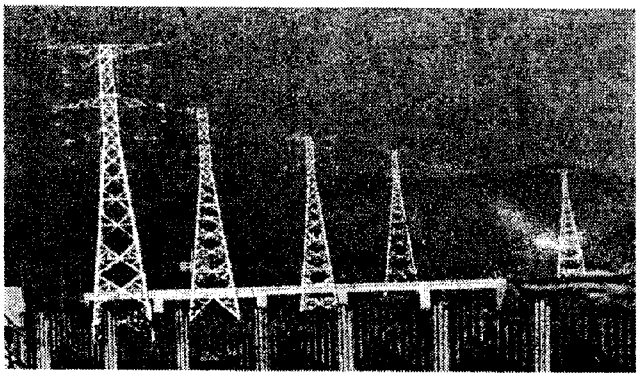

그림 2. 154kV 문산~평화 송전선로(북측구간)

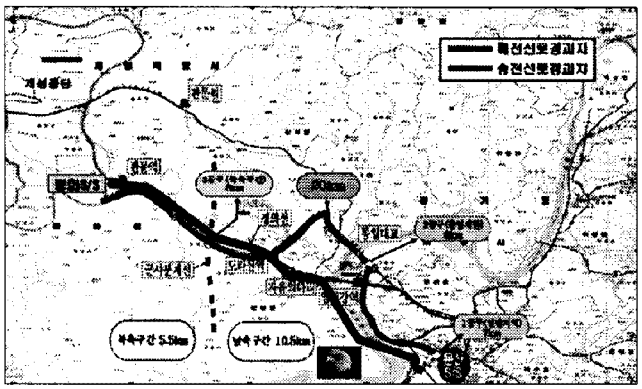

그림 3. 154kV 문산~평화 송전선로 경과지도 (2)

나. 전력수요 현황

154kV 평화변전소 준공으로 개성공단은 현재 10만kW(변압기 2Bank 증설시 20만kW 공급용량)의 전력을 안정적으로 공급받을 수 있게 되었으며 중소기업들의 개성공단 입주 증가로 인하여 전력판매도 꾸준히 증가하고 있는 추세이다.

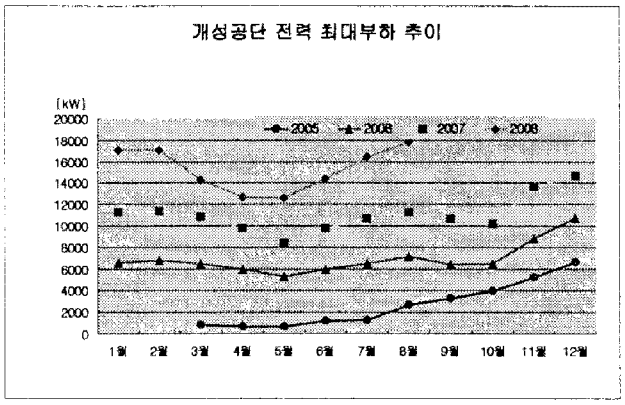

그림 4. 개성공단 최대부하 실적 (3)

2007년 기준 개성공단내 계약종별별 판매량은 산업용〉일반용〉가로등〉주택용 순으로 구성되어 있으며, 산업용 고객 호수는 19% 불과하나 전력판매량은 약 80%를 차지하여 공단특성을 잘 나타내주고 있다.

2005년도	2006년도	2007년도
33호 고객 713만kWh	58호 고객 2,816만kWh	226호 고객 4,557만kWh

표 2. 년도별 고객호수 및 전력판매량 비교 (4)

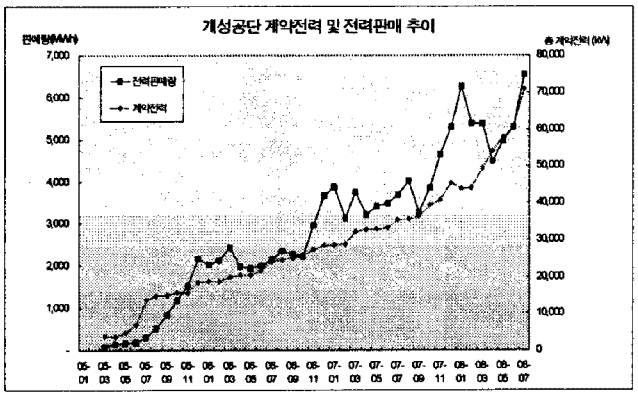

그림 5. 개성공단 계약전력 및 전력판매량 추이 (5)

3. 개성공단 전력수요 전망

현재 개성공단 1단계(공장구역 100만평)는 기반구축이 어느정도 완료된 상태이나 아직까지 2, 3단계(1단계 포함하여 총 2천만평) 확장개발은 개성공단의 경제적 잠재력보다는 앞으로 남북간의 정치적 이해관계에 따라 점진적으로 추진되리라 본다.

2, 3단계 개발의 성공적 추진을 위해서는 안정적인 전력공급이 무엇보다도 중요하며 이를 위해 정확한 전력수요 예측을 통한 최적의 전력공급 기반시설 구축이 절대적이다. 현재 개성공단 2, 3단계 개발방향 및 규모에 대한 구체적인 정부 계획이 수립되지 않고 있는 상황에서 정확한

전력수요를 예측하기는 어렵다. 개성공단 개발과 같은 국외 전력사업 수행시 전원설비의 건설 및 적정 송배전설비의 구축은 전력수요를 토대로 투자가 이루어지며 투자비 및 손익액 산정을 위한 전력수요의 예상은 기본적인 바탕이 된다.

본 논문의 개성공단의 전력수요 검토는 현대아산이 공단 개발초기에 제시했던 개성공단 1, 2, 3단계 개발계획자료를 근거로 작성하였으며 현대아산 자료에 의한 개성공단 개발 세부계획은 표 3과 같다.

구분	구역분류	부지면적 (만평)	부지 이용율 (%)	용적율 (%)	표준부하 밀도(VA)	비고
1 단계	공장구역	100	70	-	-	
	소계	100	-	-	-	
2 단계	공장구역	150	70	-	-	
	상업구역	20	60	200	80	
	생활지역	30	50	80	55	
	관광지역	50				골프장
	소계	250				
3 단계	공장구역	350	70	-	-	
	상업구역	30	60	200	80	
	생활지역	70	50	80	55	
	관광지역	100	20	20	55	골프장(80) 테마파크(20)
	소계	550				
총계		900				

표 3. 단계별 구역별 세부개발계획 (6)

1, 2, 3 단계를 합친 총 900만평을 우선 개발하고 향후 개성시가지 400만평, 확장대비구역 700만평을 합하여 총 2000만평을 개발할 예정이다. 본 장에서는 개성시내 및 확장대비구역 1,100만평 개발에 대한 전력수요 검토는 제외하고 개성공단 1,2,3단계(총 900만평)에 대한 전력수요 검토시 공장구역과 기타구역(상업, 생활, 관광구역)으로 나누었다. 또한 전력수요는 한국전력에서 사용하고 있는 신규주택 및 산업단지 수요예측 기준을 적용하여 검토하였다.

가. 전력수요 검토

□ 공장구역 전력수요 검토

개성공단 공장구역 전력수요는 한국전력에서 적용중인 업종평균 전력원단위 및 부지원단위를 적용한 계산방법을 소개하면 다음과 같다.

전력수요 산출은 다음의 식에 의한다.

$$\text{전력수요(kW)} = \frac{\text{전력원단위}(kWh/\text{백만원}) \times \text{부지면적}(m^2)}{\text{부지원단위}(m^2/\text{백만원}) \times 8{,}760(h) \times \text{부하율}} \quad (7)$$

신규주택 및 산업단지 전력수요예측 기준에서 업종별 전력원단위 및 부지원단위를 정리하여 평균을 내면 다음의 표 4와 같다.

업종명	전력원단위	부지원단위	부하율(%)
음식료품	540	4.9	46
섬유의복	2790	6.3	67
목재나무	1760	7.8	25
펄프종이	1790	4.3	42
출판인쇄	1790	1.1	40
석유화학	1010	6.2	49
요업	2060	7.7	36
1차금속	1540	2.7	51
조립금속	400	16.8	40
평 균	1,520	6.4	44

표 4. 업종별 전력원, 부지원 단위 및 부하율(8)

표8을 적용한 개성공단 공장구역의 부하 산출결과는 표 9와 같다.

개성공단 구분	개성공단 전력수요(kW)
1단계	202,635 (200MW)
2단계	303,953 (304MW)
3단계	709,224(709MW)
합계	1,215,813

표 5. 개성공단 공장구역 전력수요

□ 상업, 생활, 관광구역 전력수요 검토

상업구역, 생활구역, 관광구역의 전력수요 검토는 현재 한국전력에서 배전부하 산출시 많이 사용하고 있는 신규주택 및 산업단지전력 수요예측 기준(11)을 적용하였다. 상기 기준에서 지역별 토지용도별 표준부하밀도와 특정건축물 용도별 표준부하밀도를 보면 표6, 7과 같다.

구 분	준주거, 일반주거, 근린상업	일반상업, 유통상업	중심상업
수도권	75	80	100
광역시	60	75	85
기타	55	75	80

표 6 지역별, 토지용도별 표준부하밀도(9)

종합병원	학교	공공청사	체육시설	종교시설	문화시설
75	20	70	55	60	70

표 7 특정건축물 용도별 표준부하밀도(10)

상업구역은 수도권 인근에 위치하고 북쪽에 중심상업지구가 개발된다고 보기 어려우므로 일반상업지구의 표준부하밀도를 적용하여 80VA/㎡, 생활구역은 북측 인원의 생활수준 고려할 때 남측인원들과 혼재되어 주거한다고 보았을 때도 부하밀도는 그리 높지 않을 것으로 판단되어 기타지구의 일반주거 지역 적용하여 55VA/㎡, 관광지구는 체육시설의 부하율 적용하여 55VA/㎡을 적용하여 다음의 식(14)에 대입하여 개성공업지구의 공장구역 이외의 부하를 산출하면 표8과 같다.

전력수요(VA)=용도별 대지면적(㎡) × 용적률 × 표준부하밀도(VA/㎡)÷ 부등율 (13)

용 도		부지면적 (만평)	유효면적 (만평)	용적율 (%)	표준부하 밀도(VA)	부등율	전력수요 (kW)
2단계	상업구역	20	12	200	80	1.3	48,824
	생활구역	30	15	80	55		16,783
	관광구역	50	-	-			-
	소 계						65,607
3단계	상업구역	30	18	200	80	1.3	73,236
	생활구역	70	35	80	55		39,161
	관광구역	100	20	20	55		5,594
	소 계						117,992
총 계							183,599

표 8 개성공단 기타구역 전력수요

나. 전력수요 검토결과 분석

개성공단 예상 전력수요 산정결과 개성공단 1·2·3단계 전력수요는 아래와 같이 약 140만kW로 예상된다.

구분	예상최대부하			
	1단계	2단계	3단계	총계
공장구역	200	304	709	1,213
기타구역	-	65	118	183
합계	200	369	827	1,396

표 9 개성공단 전력수요 종합

다. 연도별 전력수요 검토

개성공단의 연도별 전력수요를 효과적으로 전망하기 위해서 다음의 곰페르츠 곡선식(11)을 적용하였다.

곰페르츠 곡선 $Y = C \times A^{(B^T)}$

Y: 목표값(당해년도 값), C : 포화점(최종 입주시 포화점)

A: 초기치(예측 초기시점의 초기값, 최종수요의 0.01%)

B : 확산속도(공단규모, 조성기간에 따라 설정), T : 시점(년도별)

위의 식에서 초기값과 입주속도의 계수적용 기준은 다음의 표 10 및 11과 같다.

구 분	설정기준	내 용
입주초기값(A)	신규공단	공장면적의 0.01%
	기존공단	현재입주율
입주속도(B)	공장면적 1㎢ 이상	0.6
	공장면적 1㎢ 이하	0.4

표10 산업단지의 초기값과 입주속도 계수적용(12)

구 분	설정기준	내 용
입주초기값(A)	신규택지/신도시	공장면적의 0.01%
	기존택지/신도시	현재입주율
입주속도(B)	50,000 가구 이상	0.6
	50,000 ~ 10,000 가구	0.4
	10,000 가구 이하	0.2

표 11 주택단지 및 신도시의 초기값과 입주속도 계수적용(13)

위의 초기값과 계수를 적용하여 기 검토된 최종수요 1,396MW를 대입하여 분석하여 표16같이 개성공단의 단계별 및 연도에 따른 전력수요 결과를 산출할 수 있다.

구분		1단계	2단계	3단계	합계
년도	년차				
		200.0	369	827.0	1,396
2007	1	19			19
2008	2	49			49
2009	3	86			86
2010	4	120	46		167
2011	5	148	116		263
2012	6	167	190		357
2013	7	179	250	165	595
2014	8	187	293	331	812
2015	9	192	322	489	1,003
2016	10	195	340	609	1,144
2017	11	197	352	690	1,239
2018	12	198	358	743	1,299
2019	13	199	363	776	1,337
2020	14	199	365	796	1,360
2021	15	200	367	808	1,375
2022	16	200	368	816	1,383
2023	17	200	368	820	1,388
2024	18	200	369	823	1,391
2025	19	200	369	825	1,393
2026	20	200	369	826	1,394
2027	21	200	369	826	1,395
2028	22	200	369	827	1,395
2029	23	200	369	827	1,396
2030	24	200	369	827	1,396

표 12 개성공단 1,2.3단계 연도별(종합) 전력수요 예상

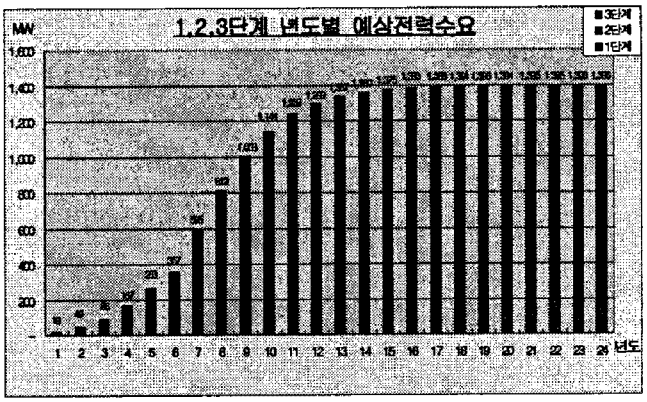

그림 6 개성공단 1,2.3단계 연도별(종합) 전력수요 예상

4. 개성공단 효율적 전력공급 방안

가. 개성공단 안정 공급을 위한 전력 인프라 구축방안

개성공단이 확장개발되어 최종 전력수요가 1,400MW에 이르면 1단계에서 기 구축된 전력 기반시설로는 전력공급이 불가능하며 개성공단 전력공급 용량 증대를 위한 송전선로 추가건설 또는 발전소 건설이 고려될 수밖에 없다. 효율적 전력공급방안으로써 남측으로부터의 직접송전을 위한 송전선로 추가건설 방안(제1안), 개성공단 인근에 발전소 건설을 통한 전력공급방안(제2안), 직접송전과 발전소 건설을 혼합한 공급방안(제3안)으로 나누어 각 안별 장단점을 비교해보면 다음의

표13과 같다.

구분	제1안 (송전방식)	제2안 (발전방식)	제3안 (송전방식+발전방식)
장점	-개성인근 발전소 건설시 남북간 전력융통에 유리 -고품질, 안정적인 전력공급 가능	-수도권 전력예비율 저하에 영향 없음 -개성공단 전력수요 증가에 탄력적 대응 가능(단위기 증설) -개성공단내 열공급 가능	-수도권 전력예비율 추가확보 가능 (개성-수도권 전력융통)
단점	-개성공단 및 대북 송전사업 병행 추진시 수도권 예비율 저하 우려	-발전설비 반입시 EAR*규정 저촉우려 -북측과 관계 악화시 발전설비 운영곤란	-발전설비 적기('13) 준공 곤란('15년 예상) - 발전설비 반입시 EAR규정 저촉우려 -북측과 관계 악화시 발전설비 운영곤란

* EAR(Export Administration Regulation) : 미국 상무부의 수출관리규정

표 13 공급방안별 장단점 비교

장단점 분석에서 검토한바와 같이 개성공단 2, 3단계 확장개발시 향후 남북통일에 대비하고, 안정적 전력융통에 대처할 수 있는 345kV 송전방식(제1안)으로개성공단의 전력공급을 시행하는 것이 바람직하다.

나. 송전방식(제1안) 채택에 따른 전력계통 모의분석

개성공단 최종수요 1,400MW를 송전방식에 의해 공급할 경우 1,400MW 대규모 부하가 수도권 북부에서 인출되어 공급될 가능성이 많으므로 이를 모의하여 영향을 분석하고 검토하는 것은 필수적이다.

전력계통 모의분석시 계통조건은 개성공단 부하를 전체 계통부하 7,080만kW(2012년 기준)(14) 상황에서 개성공단 345kV 변전소를 신설하여[345kV 변압기 4 Bank(50만kW X 4대) 수도권 북부의 A변전소와 약30km를 ACSR 480㎟ (4B)로 공급하는 것으로 가정하였다. 검토 툴로는 일반적으로 전력조류모의에 주로 사용되는 PSS/E 프로그램을 사용하였다.

(1) 정상계통 검토

□ 개성공단 조상설비 미적용시 송수전단 전압

변전소명	개성공단 부하 수준별(%) 전압(kV)			설비명	개성공단 부하 수준별(%) 설비 부하율(%)		
	0	50	100		0	50	100
A	359.3	357.3	351.5	A-개성 T/L	-	16	35
개성공단	359.6	353.3	341.8	개성공단 MTr	-	36	75
※ 페란티전압 (개성공단측 1회선 편단개방시 선로말단 전압과 A변전소와의 전압차) : 0.3kV (편단개방시 선로 말단 전압은 350.07kV, A S/S 전압은 349.8kV)							

표14 개성공단 부하수준별 전압 및 설비부하율(조상설비 미적용)

□ 개성공단변전소에 부하 100% 및 S.C 30만kVAR 적용시 송/수전단 전압

변전소명	개성공단 SC 30만kVAR 적용시 전압
A	355.98
개성공단	351.33

표 15 개성공단 변전소 송수전단 전압(S.C 30만kVar)

(2) 고장시 계통 검토

□ A-개성공단T/L 1회선 고장시

○ 개성공단 조상설비 미적용시 송/수전단 전압

변전소명	개성공단 부하 수준별(%) 전압(kV)		
	0	50	100
A	359.12	356.68	349.58
개성공단	359.44	348.03	327.28

표 16 고장시 개성공단 변전소 송수전단 전압(조상설비 미적용)

○ 개성공단S/S에 부하 100% 및 S.C 30만kVAR 적용시 송/수전단 전압

변전소명	개성공단 SC 30만kVAR 적용시 전압
A	354.55
개성공단	343.42

표 17 고장시 개성공단 변전소 송수전단 전압(S.C 30만kVar)

(3) 동적 전압검토

○ 부하모델 : 여름철 15시의 부하모델 사용

○ 최초가압시 모의 프로세서

- 무고장지속(1.0초) → A S/S-개성공단#1T/L 투입 (1.0초) → A S/S-개성공단#2T/L 투입(3.0초) →개성공단 #1MTr 및 1/4부하 투입(5.0초) → 개성공단 #2MTr 및 1/4부하 투입(7.0초) → 개성공단#3MTr 및 1/4부하 투입(9.0초) → 개성공단 #4MTr 및 1/4부하 투입(11.0초) → 종료(13.0초)

○ 재폐로실패 동적 안정도 모의 프로세서

- 무고장지속(1.0초) → 3상단락고장 발생(1.0초) → 고장제거 및 고장선로 트립(1.1초) → 재폐로 및 영구고장(1.6초) → 고장제거 및 선로트립(1.7초) → 종료(10.0초)

○ 개성공단 최초가압 모의

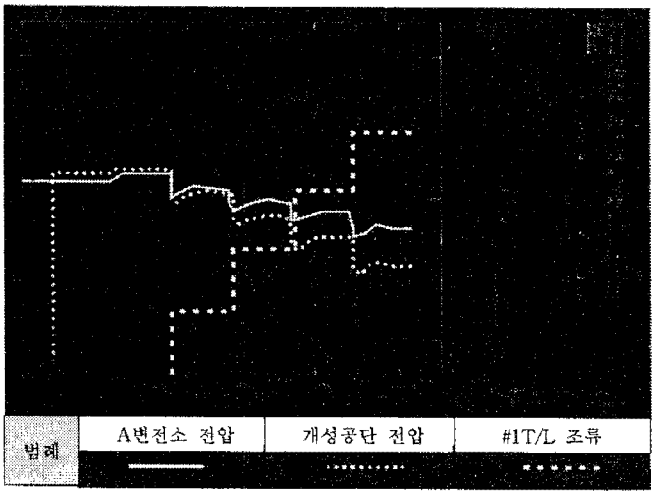

그림 7 개성공단 최초가압 동적모의결과

상기 그림 7에서는 개성공단 부하 최초공급시 부하수준별 송/수전단 전압저하 현상을 볼수 있으며,

○ A-개성공단T/L 1회선 재폐로실패(SC적용 /미적용)
- 전압/조류

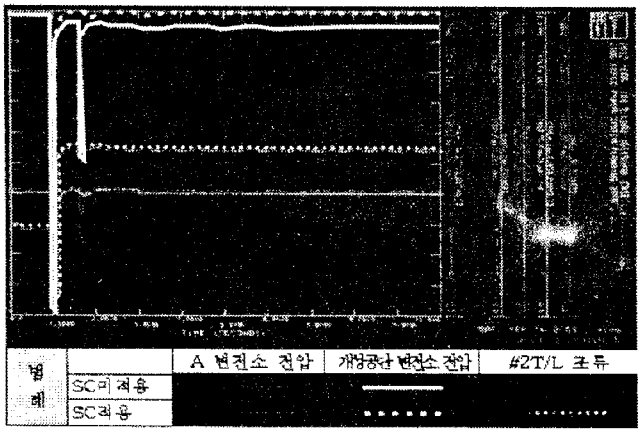

그림 8 A-개성공단T/L 1회선 고장시 동적모의결과

그림 8에서와 같이 송전선로 1회선 고장시 전압동요 현상은 없는 것으로 확인된다.

- 인근 발전기 출력변동

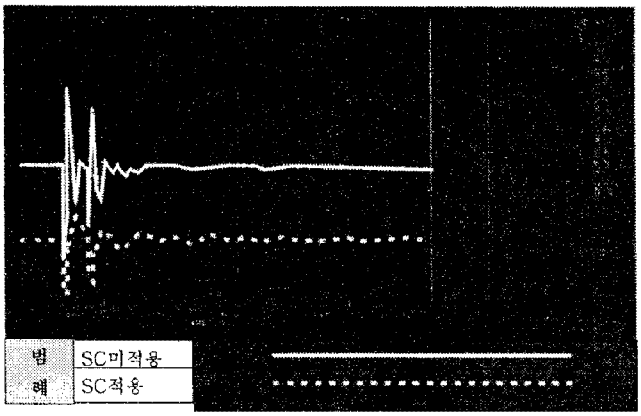

그림 9 인근발전기 출력변동

그림 9에서와 같이 송전선로 1회선 고장시 공급단 인근발전기의 출력변동은 45%정도이며, 감쇄가 빠르고 안정적이므로 상기 동적검토 결과는 안정적임을 알 수 있다.

개성공단부하의 50%까지는 개성공단S/S에 별도의 조상설비 없이 전력공급이 가능하며, 100% 부하에서는 정상운전시 과도한 전압저하로 인하여 개성공단S/S에 30만kVAR 이상의 조상설비 설치가 필요할 것으로 보인다. A-개성공단 T/L의 Feranti 전압은 0.3kV 정도로 편단 개방시 송전선로 말단의 전압상승에 의한 절연파괴 우려는 없으며, A S/S-개성공단S/S T/L 1회선에 3상단락 고장 발생시 인근 양주 C/C 발전기(G/T)의 출력변동은 ±7.5만kW로 발전기 출력(22만kW)의 34%정도이고, 단시간(약3초)에 감쇄하므로 문제가 없는 것으로 판단된다. 결론적으로 개성공단 전력공급을 위한 계통상의 특별한 어려움이 없는 것으로 생각되며, 다만 개성공단 부하수준에 맞는 조상설비 설치가 필요할 것으로 검토되어진다.

5. 결 론

남북경협의 상징인 개성공단의 성공적인 개발은 남북관계의 획기적인 개선은 물론 고비용 저효율의 국내중소기업 활로개척에 지대한 영향을 끼치게 될 것이다 따라서 공단개발의 핵심인프라인 전력공급설비의 효율적인 구축은 개설공단의 확장개발에 중요한 변수로 작용할 것으로 판단된다

본 연구에서는 개성공단의 확장개발에 따른 예상전력수요를 산정하고, 관련선로의 조류 및 전압 안정성 검토, 고장시 전압 dynamics를 이용한 안정도 분석 등을 통한 최적전력공급방안으로 345kV 직접송전방안을 제시하였다

Reference

[1]~[2]한국전력 내부자료
[3] 한국전력 종합계량정보시스템(IMIS)
[4]~[5] 한국전력 개성지사 판매정보 (개성지사 통계)
[6] 현대아산 홈페이지-개성공단 구역별 개발총계획 (www.hyundai-asan.com)
[7]~[10] 신규주택 및 산업단지 전력수요예측기준 , 2003년 6월, 한전 영업처
[11]~[13] 지역별 수요 및 부하특성 예측기법 개선연구, '1998년, 한국전력 전원계획처
[14] 산업자원부, 제3차 전력수급계획(2006~2020), 2006. 12