



공학전문석사 학위 연구보고서

배전선로 지중화율 증가에 의한 주변압기 및 배전계통 영향에 관한 연구

A Study on impact Transformer and Distribution network due to the increase of underground cables at Distribution Power system.

2021년 2월

서울대학교 공학전문대학원

응용공학과 응용공학전공

이 완 석

배전선로 지중화율 증가에 의한 주변압기 및 배전계통 영향에 관한 연구

지도교수 윤용태

이 프로젝트 리포트를 공학전문석사 학위 연구보고서로 제출함 2021년 2월

서울대학교 공학전문대학원 응용공학과 응용공학전공 이 완 석

이완석의 공학전문석사 학위 연구보고서를 인준함 2021년 2월



국문초록

국내 전력시스템에서 배전계통의 전압조정 목표는 부하량에 따라 경부 하, 중부하, 첨두부하로 구분하여 22.0kV ~ 23.9kV의 전압 범위를 설 정하여 운영하고 있다. 전력계통 운영자는 배전계통 전압유지 범위를 준 수하고 저압측 수용가 전압 안정화를 통한 고품질 전력공급을 위해 전압 자동제어 장치와 연동하는 154kV ULTC 권수비 제어, 배전선로 SVR 권수비 제어, Shunt Capacitor 제어를 일반적으로 적용하여 운영하고 있다. ULTC와 SVR 권수비 체어는 LDC(Line Drop Compensation) 로직을 통해 부하전류의 크기와 배전선로의 직렬임피던스 R과 L 선로정 수를 통해 전압강하 예상치를 산출하여 전압을 보상한다. Shunt Capacitor 제어는 부하에 의해 발생하는 유도성 무효전력을 보상하기 위해 용량성 무효전력을 공급하는 역률제어를 통해 전압을 보상한다. 결 론적으로 현재 배전계통에서 주로 적용하는 전압 보상 방식은 부하변동 에 따른 전압강하를 보상하기 위해 전압을 높여주는데 그 목적을 두고 개발된 시스템들인 것이다.

이와 같은 배전선로 전압보상 방식은 가공선로 위주로 배전계통이 구 성된 과거에는 전압 유지에 큰 어려움이 없었을 것이다. 하지만 배전계 통의 구성이 직렬 임피던스 성분 외에 병렬 어드미턴스 성분을 함께 고 려해 주어야 하는, 좀 더 정확하게는 선로 커패시턴스 성분을 고려해야 하는 상황이 도래한다면 지금 우리가 표준으로 삼고 있는 전압 제어 방

- i -

식의 문제점이 드러날 수 밖에 없을 것이다.

산업화와 함께 송전선로와 배전선로 구성에 주력으로 사용되는 지중 전력케이블은 가압된 도체가 외부에 노출되지 않는 물리적 구조와 특성 으로 가공선로에 비해 태풍과 낙뢰 등 일기변화에 유리하고 외물 접촉 고장을 방지할 수 있어 전력공급의 신뢰도를 높일 수 있다. 또한 지상에 노출된 설비가 없기 때문에 감전 위험성이 낮고 도시 미관상 유리하며 건설 이후 유지보수 및 점검에 극히 적은 비용이 소요된다. 이와 같은 장점으로 1929년 당인리-영등포, 아현동-순화동 구간을 효시로 시작된 배전계통 지중화는 어느새 대도시를 중심으로 지중화율이 50%를 넘어 설 정도로 가속화 되고 있고 그 영향으로 일부 154kV 주변압기에서는 인출된 배전선로의 회선 구성이 90%이상 지중으로 이루어진 사례가 등 장하고 있다.

이 경우 선로의 직렬 임피던스와 부하 변화에 따른 전압 강하만을 고 려하는 기존 배전선로 전압보상 방식만으로는 안정적인 전압유지를 할 수 없고 심지어 전압 변화에 대한 예측조차 수행할 수 없게 되었다. 앞 에서 우려했던 지중케이블 커패시턴스 성분에 의해 주변압기 용량성 무 효전력 손실이 증가하고 그로인해 역률이 저하되고 있으며 배전계통 전 압이 상승하는 현상이 실제로 국내 전력계통에서 발생하고 있는 것이다. 본 연구 보고서는 신도시 지역에 운영되는 주변압기의 무효전력 증가 와 역률 저하, 배전계통 전압 변화의 현상을 목격하면서 시작하게 되었 다. 이 현상이 도시화 산업화와 더불어 확대되는 배전계통 지중화라는 원인에서 기인했다는 가설을 설정하고 실제 전력계통의 Data와 이론적

– ii –

해석을 통해 가설을 검증하는 과정을 포함하고 있다.

사례연구에서는 실제 배전계통 Data를 활용해 등가모델을 구성하고 시뮬레이션 Tool을 활용해 본 연구과제의 가설에 대한 검증을 수행함으 로써 연구 결과의 타당성과 논리성을 검증하였다.

주요어 : 배전선로, 계통 기준전압, 지중케이블, 커패시턴스, 무효전력 학 번 : 2019-24844

목 차

1	••••••	•••••	••••	•••••	서 론	장	제 1
1	•••••	목적	및	배경	연구의	1 절	제
4		구성	및	개요	논문의	2 절	제

제 2 장 배전계통의 특징 및 전압제어	6
제 1 절 배전계통의 특징	6
제 2 절 배전계통 전압유지 범위	8
제 3 절 배전계통 전압제어기기	10
1. 주변압기 ULTC 제어	11
2. Shunt Capacitor 제어	14
3. 배전선로 SVR 제어	18
제 3 장 배전계통 현상 및 문제점 확인	20
제 3 장 배전계통 현상 및 문제점 확인 제 1 절 전력계통 현상 확인	20 20
제 3 장 배전계통 현상 및 문제점 확인 제 1 절 전력계통 현상 확인	20 20 21
 제 3 장 배전계통 현상 및 문제점 확인 ······ 제 1 절 전력계통 현상 확인 ······ 1. 지역별 변압기 운전 Data 비교 ····· 2. 배전선로 증설 시 변압기 운전 Data 변화 ····· 	20 20 21 24
 제 3 장 배전계통 현상 및 문제점 확인 ······ 제 1 절 전력계통 현상 확인 ······ 1. 지역별 변압기 운전 Data 비교 ····· 2. 배전선로 증설 시 변압기 운전 Data 변화 ····· 제 2 절 전력계통 문제점 확인 ····· 	 20 20 21 24 25

제 4 장 배전 지중화율 증가 영향 분석	30
제 1 절 배전계통 지중화 현황	30
1. 배전선로 지중화 현황	30
2. 지역별 변압기 배전선로 지중화율 비교	33
제 2 절 기존 배전계통 등가회로	35
제 3 절 배전선로 선로정수 산출	39
제 4 절 배전계통 지중화를 고려한 등가회로 제안	43

제 5 장 사례연구	47
제 1 절 연구대상 배전계통	47
제 2 절 사례연구 결과	50
제 3 절 Reactor 적용 효과 사례연구	54

제	6	장	결	론	••••••	58
---	---	---	---	---	--------	----

참고문헌	62
Abstract	64

표 목 차

표	2.2.1	고압 배전계통 전압유지 범위 8
표	2.2.2	저압 배전계통 전압유지 범위
표	2.3.1	LDC 로직 배전선로 전압강하 산출식 13
표	3.1.1	구도심지 부하공급 변압기 운전 Data 22
표	3.1.2	신규 택지지구 부하공급 변압기 운전Data 23
표	3.1.3	배전선로 신설 시 변압기 운전 Data 변화 24
표	3.2.1	배전선로 기준용량별 배전선로 인출 회선수 27
표	3.2.2	부하별 역률 특성
표	4.1.1	국내 주요 대도시 배전계통 지중화율 31
표	4.1.2	인천지역 배전계통 지중화율 32
표	4.1.3	장기변전소 변압기별 지중화율 33
표	4.1.4	지역별 변압기 배전선로 지중화율 비교 34
표	4.2.1	전력선 선로정수
표	4.3.1	배전선로 Type별 선로정수 산출결과 41
표	5.1.1	시뮬레이션 변수 49
표	5.2.1	시뮬레이션 결과1 49
표	5.2.2	시뮬레이션 결과2
표	5.3.1	리액터 적용 효과 사례연구 결과 56

그림 목차

그림	2.1.1	154kV 강압용 변전소 단선결선도 7
그림	2.2.2	고압 배전계통 단선도 예시 10
그림	2.3.1	배전계통 전압제어 장치11
그림	2.3.2	변압기 ULTC 제어시스템 구성 12
그림	2.3.3	ULTC 동작 Sequence14
그림	2.3.4	전력계통 Shunt Capacitor 적용예시15
그림	2.3.5	배전계통 계통도16
그림	2.3.6	SVR 회로 구성 19
그림	3.1.1	지역별 변압기 운전 현황 20
그림	4.2.1	전력선 4단자 등가모델 35
그림	4.2.2	단거리 전력선 및 배전선로 등가모델 37
그림	4.2.3	단거리 배전선로 등가모델 전압 벡터도 39
그림	4.3.1	가공배전선로 모델링 40
그림	4.3.2	지중배전선로 모델링 40
그림	4.3.3	배전선로 Type 별 구조 42
그림	4.4.1	중거리 선로 π(Pi) 등가모델 43
그림	4.4.2	π(Pi) 등가모델 적용 전압 벡터도
그림	5.1.1	사례연구 배전계통 모델 48
그림	5.3.1	리액터 적용 효과 사례연구 구성 55

제1장서론

제 1 절 연구의 배경 및 목적

국내 전력시스템에서 저압 수용가에 직접적인 전력을 공급하는 배전계 통은 154kV/22.9kV 주변압기로부터 변성된 전력을 3상 4선식으로 구 성하여 공급하고 있다. 전기사업자는 고객에게 공급되는 전기 에너지의 품질관리를 위해 전압, 주파수, 정전시간의 세 가지 요소를 관리하고 있 으며 이 가운데 배전계통 전압유지 범위는 아래와 같은 기준하에 운영하 고 있다[1].

① 경부하 : 22.0kV ② 중부하 : 22.9kV ③ 첨두부하 : 23.9kV

배전계통에서 고객에게 공급되는 전기 에너지의 전압을 위의 기준범위 이내로 유지하기 위한 전압제어 방식으로는 강압용 변압기 권수비 조정 을 위한 ULTC 제어, 23kV BUS Shunt Capacitor 운영, 배전 선로측 SVR(Step Voltage Regulator) 권수비 제어가 일반적으로 적용되어지 고 있다. 강압용 변압기 ULTC 제어 방식은 배전선로 등가회로를 저항 과 리액턴스의 직렬조합으로 구성하고 부하전류 증가에 따라 발생하는 전압강하를 보상하는 방식이다. 23kV BUS에 연결된 Shunt Capacitor 제어는 일정 용량의 Capacitor를 투입하고 개방함에 따라 변동되는 용 량성 무효전력으로 부하에 의한 유도성 무효전력을 상쇄시키는 역률제어 방식을 따른다. 배전선로에 설치된 SVR 제어는 장경간 배전선로에서 임 피던스에 의한 전압강하를 보상하기 위한 방식으로 변압기 ULTC 제어

알고리즘과 동일한 전압보상 로직을 적용한 권수비 제어를 활용한다. 위에서 언급한 배전선로 전압제어 방식은 모두 선로 부하가 증가할 경 우 전원측에서 부하측으로 갈수록 전압 강하가 발생한다는 전제하에 이 루어지는 전압 보상을 위한 방안이다. 이와 같은 제어방식의 전제는 배 전계통의 선로 등가모델을 직렬 임피던스인 저항과 인덕턴스만으로 한정 지은 형태로, 가공 배전선로의 경우에는 선로 등가모델이 실제 계통과 부합되어 전압강하에 대한 예측이 가능하고 규정전압 유지에도 큰 어려 움이 발생하지 않았다. 하지만 배전계통의 지중화가 확대 되면서 기존 등가모델 적용에 문제점을 보이기 시작하고 있다.

배전선로 지중화 공사는 산업화 그리고 도시화로 보다 신뢰성 높은 전 력공급에 대한 요구와 가공선로에 대한 민원 그리고 환경적 측면에 대한 인식변화에 의해 지속적으로 확대되고 있다. 심지어 최근 신설된 변전소 의 경우 한 변압기에서 인출되는 배전선로 회선이 모두 지중케이블로 시 공되는 사례도 빈번하게 생겨나고 있다. 지중케이블은 도체와 중선선간 거리 그리고 절연을 유지하기 위해 적용된 유전체 등에 의한 물리적 특 성에 의해 커패시턴스 성분이 가공선로에서 보다 매우 크기 때문에 전력 계통에 직접적인 영향을 주게 된다.

지중케이블의 커패시턴스 성분은 배전계통 등가모델 구성 시 선로에 병

- 2 -

렬 연결로 표현될 수 있으며 이 영향으로 인해 계통에 용량성 무효전력 이 발생하고 배전계통 전압이 상승하는 문제점을 발생시킬 것으로 예측 할 수 있다. 실제로 신도시 또는 신규 산업단지 계획 지구에 공급되는 배전망의 지중화율이 증가됨에 따라 계통의 기준전압 유지에 문제점을 드러내고 있다.

본 연구는 배전계통에 전력을 공급하는 변압기의 무효전력 증가와 역률 저하 그리고 전압상승 현상을 주목하게 되어 그 원인을 찾아가는 과정에 서 시작 되었다. 위와 같은 현상이 배전선로 지중화율 증가라는 원인에 의해 발생하게 된 문제라는 가설을 설정하고 이에 대한 검증을 해나가는 과정을 포함하고 있다. 실제 국내 전력계통에서 운전중인 변압기 운영 Data와 23kV 배전계통의 전압 Data를 분석하여 지중화율과의 상관관계 를 도출하고 선로의 직렬 임피던스만을 적용한 현행 배전계통 등가모델 과 이를 활용한 전압 제어방식이 어떠한 문제점을 갖고 있는지 그 한계 에 대해 논의 하였다. 이후에는 배전선로의 지중화율 증가에 따른 선로 커패시턴스 성분을 고려한 등가모델을 제시하고 그 타당성을 수학적으로 검증하는 과정을 포함하고 있다. 사례연구에서는 위의 과정에서 제시한 문제점과 이론적 근거에 대한 모의를 위해 지중케이블로 구선된 간략화 된 배전계통을 구성한 후 배전선로 등가모델, 선로 회선수, 선로긍장, 부 하량의 변수를 설정하여 시뮬레이션을 통해 검증을 수행하였다.

제 2 절 논문의 개요 및 구성

본 연구에서는 배전선로 지중화율 증가가 용량성 무효전력을 발생시켜 배전계통 전압 상승에 영향을 준다는 가설을 설정하고 이에 대한 검증과 개선방안을 제시하기 위해 실제 국내 전력계통 운영 Data를 활용해 등 가모델을 구성하였고 Matlab Simulink 프로그램을 통해 시뮬레이션을 수행하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다.

제 1장에서는 본 연구의 배경 및 목적 그리고 논문의 개요 및 구성에 대해 살펴보았다.

제 2장에서는 배전계통의 특징과 현재 배전계통 전압 유지를 위해 적 용하고 있는 전압보상 방식에 대해 조사한 결과를 소개할 것이다.

제 3장에서는 현재 전력계통에서 발생되는 용량성 무효전력 증가와 배전계통 전압상승 현상에 대해 조사하고 이러한 현상에 의해 주변압기 와 배전계통에 발생하는 문제점에 대해 기술하고 있다. 또한 용량성 무 효전력 증가와 전압상승이 발생하는 원인을 추정하는 과정을 포함하고 있다.

제 4장에서는 배전선로 지중화율 증가가 전력계통에 미치는 영향의 상관관계 분석을 위해 지역별, 변압기별 배전선로 지중선로 비율에 대한 자료조사 결과를 포함하고 있다. 또한 현재 배전계통 전압제어를 위해 적용하고 있는 배전계통 등가모델과 알고리즘의 한계를 분석하고 계통

- 4 -

안정도 제고를 위해 적용되어야할 개선 방안을 포함한다.

제 5장에서는 실제 국내에서 운영되고 있는 지중화율 비율이 높은 배 전계통을 대상으로 모의 선로를 구성하고 Matlab Simulink 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 함으로써 본 연구 논문에 대한 검증과 개선 방안의 타당성을 증명하는 과정을 포함하고 있다. 각 사례연구의 Case별로 선 로 긍장, 회선수 등의 변수를 적용하여 실제 배전계통에서 영향을 줄 수 있는 요소들에 대한 검토 또한 사례연구에 포함 시켰다.

제 6장에서는 본 연구의 연구 배경으로부터 사례연구까지의 사항을 종합 정리하고, 본 연구의 의미와 적용 분야 그리로 향후 추가 연구가 필요한 분야를 제시하였다.

제 2 장 배전계통의 특징 및 전압제어

제 1 절 배전계통의 특징

발전소에서 생성된 전력은 전송 중 손실을 줄이기 위해 발전소 내에 있는 승압용 변압기를 통하여 전압을 높여 송전선로를 통해 전력계통에 전달되고 배전용 변전소의 강압용 변압기를 거쳐 배전선로를 통해 고객 에게 에너지가 전달된다. 배전용 변전소는 송전전압을 배전 고압 계통까 지 낮추어 주는 강압용 변압기와 선로를 인출하기 위한 모선과 차단기 그리고 이를 보호하는 보호계전기 등으로 구성된다.

각 설비 연결은 강압용변압기 2차 차단기로부터 연결된 모선에 간선 (Feeder)이라고 칭하는 고압계통 배전선이 차단기를 통해 접속되고(국 내의 경우 7회선까지) 배전계통의 각 구간별 퓨즈 및 리클로저를 통해 연결된 배전용 변압기로부터 220~380V 전압 범위의 저압 배전계통으 로 분산되어 수용가에 전력을 공급한다[2].

고압 배전계통 : 배전용 변압기의 1차측 전압레벨 범위에서 전기
 에너지를 공급하는 배전계통

저압 배전계통 : 배전용 변압기의 2차측, 수용가 사용 저압레벨
 범위에서 전기에너지를 공급하는 배전계통

고압 배전계통의 구성 방식은 방사상 배전계통(radial distribution systems), 루프 배전계통(loop distribution systems), 네트워크 배전 계통(network distribution systems)으로 분류되는데 국내 배전계통은 방사상 배전계통을 적용하고 있다. 방사상 배전계통은 부하밀도가 낮은 지역에 가장 경제적으로 적용 가능한 방식으로 인출된 3상 간선은 짧게 는 1~2km, 길게는 50km까지 전개 될 수 있으며 각 간선에서 지선을 통해 상 불평형을 고려하여 부하를 연결하여 공급하고 있다[2].



그림 2.1.1 154kV 강압용 변전소 단선결선도

제 2 절 배전계통 전압유지 범위

전력계통을 통해 공급되는 전기에너지의 품질관리를 위해 전압, 주파 수, 정전시간의 세가지 요소가 관리되고 있으며 이 가운데 1차 배전계통 과 2차 배전계통 전압유지 범위는 아래와 같은 기준하에 운영되어지고 있다[1].

제2장 전기품질

제5조 전압조정목표

②제1항의 전압조정목표는 다음 각 호와 같다.

3.배전용 변전소는 배전선 인출측의 전압을 기준으로 중부하시는 최대 계통 운전 전압으로 하고 경부하시에는 배전선의 선로 전압 강하를 고려하여 중부하시와 경부하시의 부하비율에 따라 결정한다. 다만, 22.9kV 계통의 전압조정장치를 수동으로 운전하는 경우에는 아래의 부하대별 전압조정 목표에 따른다.

가. 경부하 : 22.0kV 나. 중부하 : 22.9kV 다. 첨두부하 : 23.9kV

표 2.2.1 고압 배전계통 전압유지 범위

표준 전압	허용 오차
110볼트	110볼트의 상하로 6볼트 이내
220볼트	220볼트의 상하로 13볼트 이내
380볼트	380볼트의 상하로 38볼트 이내

표 2.2.2 저압 배전계통 전압유지 범위

전력회사들은 정상상태에서 수용가에 공급되는 배전전압을 기준범위 이내로 유지하기 위해 변압기 ULTC 권수비를 제어하는 자동전압제어장 치(Automation Voltage Regultor) 등을 적용하고 있으며 일반적인 설 계방법은 부하량에 따른 전압 강하를 산출하여 배전계통 전압을 높여 전 력을 전송하는 방식을 적용하고 있다.

이와 같은 원리에 의해 경부하 대비 중부하 시 송출전압 레벨이 높게 유지되고 그림 2.2.2와 같이 구성된 일반적인 배전선로의 경우 변전소에 가까운 수용가일수록 높은 전압의 전력을 수전받게 되고 배전선로 말단 에 위치한 수용가일수록 낮은 전압을 수전받게 되는 것이 일반적이다.

이와 같은 전기에너지 품질 관리를 위한 배전계통 적정 전압 유지는 국내 전력시장에서만 국한된 것이 아닌 전 세계 전력계통 운영자의 공통 된 의무이자 책임인 것이다. [2].



그림 2.2.2 고압 배전계통 단선도 예시 (1개 배전선로)

제 3 절 배전계통 전압제어기기

배전계통에서 규정한 전압유지 범위를 만족시키기 위해 일반적으로 사용하는 전압제어 방식에는 부하 시 탭절환장치(Under load Tap Changer, ULTC), 23kV BUS Shunt Capacitor(병렬 커패시터), 배전 선로 전압조정기(SVR)이 대표적으로 이용되고 있다.

ULTC는 배전용 변전소의 변압기에 설치되어 배전선로에서 발생한는 전압강하를 예상하여 전압을 보상하는 방식이다. 23kV BUS에 연결된 Shunt Capacitor 제어는 일정 용량의 Capacitor를 투입함으로서 무효 전력을 공급하는 역률제어 방식에 의해 전압을 보상한다. 배전선로에 설 치된 SVR 제어는 장경간 배전선로에서 임피던스에 의한 전압강하를 보 상하기 위한 방식으로 변압기 ULTC와 유사한 알고리즘으로 권수비 제 어를 수행한다[3][4].



그림 2.3.1 배전계통 전압제어 장치

 주변압기 ULTC(Under Load Tap Changer) 제어 배전용 변전소의 변압기에는 전원공급이 중단되지 않는 상태에서 변압 기 탭권선의 위치를 바꾸어 1, 2차 권수비 제어를 통해 자동적으로 2차 측 배전계통 전압을 조정할 수 있는 부하 시 탭절환장치 ULTC가 내장 되어 있다. 일반적인 변압기 ULTC 제어 시스템은 그림 2.3.2와 같이 배전계통의 전압과 부하전류를 측정하는 입력부와 기준전압 대비 배전계 통의 전압 차이를 판단해 자동으로 전압을 제어하는 자동전압제어장치 (AVR), 그리고 제어신호를 수신받아 변압기 1,2차 권수비를 변경하는 ULTC 탭권선을 구성된다[3][5].



그림 2.3.2 변압기 ULTC 제어시스템 구성

자동전압제어장치는 계기용변성기(PT/CT)로부터 23kV 배전계통 실시 간 전압과 부하전류 측정값을 입력 받아 LDC(Line Drop Compensation) 로직을 통해 부하중심점까지의 선로전압 강하 예측치를 산출한다. LDC 로직은 사전에 입력된 배전선로 선로정수 직렬성분인 등 가저항(Ur)과 등가리액턴스(Ux)가 조합된 아래 표 2.31과 같은 수식으 로 구성되어 부하전류가 늘어나면 전압강하가 증가하도록 되어있다[7].

서그 거야가치	$Ur = In \cdot (Uct/Upt) \cdot r \cdot L \cdot K$
신도 신입성야	$Ux = In \cdot (Uct/Upt) \cdot x \cdot L \cdot K$
Ur : 저항성 전압강히	▶, Ux : 유도성 전압강하
In : LDC 사용 Tap의	니 정격전류(A),
Uct : 변류비 (AVR•	비 입력되는 변류비)
Upt : 변압비 (AVR•	ㅔ 입력되는 변압비)
r : 한 상당 저항성 선	ປ로저항 (Ω/km)
x : 한 상당 유도성 ረ	선로저항 (Ω/km)
L : 부하 중심점까지의	의 길이 (km)

표 2.3.1 LDC 로직 배전선로 전압강하 산출식

배전선로 전압강하 예측치 산출 이후 자동전압제어장치 동작 시퀀스는 그림 2.3.3과 같이 진행된다. LDC 로직을 통해 보상된 배전계통 전압 (V_m)과 목표전압(V_r)을 비교 후 사전에 설정된 dead band 범위에서는 전압 제어신호 송출 없이 운영된다. 이후 dead band를 벗어날 경우 타 이머가 기동되어 일정 시간동안 유지(time delay) 된다면 Motor Drive Unit을 통해 ULTC Tap 제어를 수행해 변압기 1, 2차 권수비가 변경되 어 목표전압을 유지하게 된다. 이때의 time delay는 배전계통 부하변동 에 의한 전압 변화의 실시간 추종에 의한 과전압/저전압 문제를 최소화 하고 ULTC의 빈번한 동작에 의해 발생 가능한 접점 등의 마모, 기계적 수명 단축을 줄이기 위해 적용된다. 국내 전력계통에서 일반적으로 사용 하는 154kV 강압용 변압기의 경우 21개의 Tap을 운영하고 있으며 Tap간 전압차이는 1.25%이다[5][6].



그림 2.3.3 ULTC 동작 Sequence

2. Shunt Capacitor(병렬커패시터) 제어

Shunt Capacitor는 전력계통의 모선 또는 선로에 병렬로 연결되어 중부하 시 유도성 무효전력에 상응하는 용량성 무효전력을 공급 함으로써 변압기 역률 개선을 통해 부하공급 용량을 확보하고 전압 강하를 개선하는 용도로 활용되고 있다. 일반적인 수용가 부하 특성이 무효전력을 흡수하는 지상역률 특성을 보이기 때문에 Shunt Capacitor를 통해 소모되는 무효전력과 유사한 양의 용량성 무효전력을 공급해 역률과 전압강하를 개선하는 것이다.

전력계통에서 Shunt Capacitor는 개폐장치의 On/Off 제어에 의해 단계적으로 투입되고 있으며 다양한 전압 레벨에서 적용을 하고 있다. 아래 그림 2.3.3은 전력계통에 적용된 Shunt Capacitor 예시를 보여준다[8].



그림 2.3.4 Shunt Capacitor 적용예시

배전 계통에서도 변전소로부터 1차 배전계통에 이르기까지 적절한 위치를 선정하여 Shunt Capacitor를 운영할 수 있으나 국내 전력계통에서는 적용하지 않고 있다. 그림 2.3.4는 Shunt Capacitor의 역률제어를 통한 배전계통 전압보상의 이론적 설명을 위한 간략화된 계통도이다[6][9].



그림 2.3.5 배전계통 계통도

위의 배전계통에서 배전용 변전소 모선전압은 V_1 , 배전 부하측 전압은 V_2 , 배전선로 임피던스는 R+jX로 표현하였고 이 경우 배전계통에서 의 전압강하 ΔV 는 아래와 같은 식으로 나타난다[9].

$$\overline{V_1} - \overline{V_2} = I(R+jX)$$

$$= (R+jX)(\frac{P-jQ}{\overline{V_2^*}})$$

$$= \frac{(RP+XQ) + j(XP-RQ)}{\overline{V_2^*}}$$
(2.3.1)

이때 $\overline{V}_2 = V_2 \angle 0$ 라고 하면

$$\overline{V}_1 - \overline{V}_2 = \frac{(RP + XQ) + j(XP - RQ)}{\overline{V}_2} \quad ^{(2.3.2)}$$

가 되고 배전선로의 경우 $R \approx X$ 인 경우 위 식에서 실수부가 허수부 에 비해 매우 크기 때문에 결과적으로 전압강하 ΔV 는 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_1 - V_2 = \Delta V \approx \frac{RP + XQ}{V_2} \qquad (2.3.3)$$

여기에 Shunt Capacior가 배전선로 부하측에 설치되어 있다면 부하에 대한 Shunt Capacitor의 무효전력 보상으로 전압강하는 다음과 같은 식 으로 표현된다[10][11].

$$\Delta V \approx \frac{RP + X(Q_L - Q_C)}{V_2} \qquad (2.3.4)$$

위 식에서 보여지는 바와 같이 배전계통의 부하 특성에 맞게 적절한 용 량의 Shunt Capacitor를 설치한다면 진상 무효전력 공급을 통해 전압강 화를 보상할 수 있음을 확인할 수 있다. 다만 투입된 Shunt Capacitor 의 용량이 부하로부터 흡수하는 무효전력보다 많을 경우 부하단 전압 상 승의 문제점 또한 발생시킬 수 있기 때문에 적정한 투입 용량의 검토가 필요하다.

3. 배전선로 SVR(Step Voltage Regulator) 제어

장거리 또는 부하변동이 심한 고압 배전선로의 경우 선로 임피던스 등에 의한 변전소 근단과 선로말단 전압 편차가 크게 발생하기 때문에 이에 대한 보상을 위해 SVR(Step Voltage Regulator)을 적용하여 규정 전압을 유지하도록 하고 있다. SVR의 회로 구성 및 구조는 그림 2.3.6과 같이 단권변압기와 부하시 탭 전환 장치로 구성되어 있다[12].



그림 2.3.6 SVR 회로 구성

SVR의 전압제어는 단권변압기 직렬권선의 탭 변경에 의해 이루어지며, 전압 제어 방법은 단권변압기 2차측에 흐르는 전압과 전류를 이용하여 기준전압과 송출전압 사이의 오차를 계산하고 오차가 dead band 범위를 벗어나면 탭값을 증가 혹은 감소시킴으로써 배계통의 정압을 유지 하는 방식을 채용하고 있다. 전체적인 동작 시퀀스와 LDC 제어로직을 적용하는 면에서 배전용 변전소 변압기 ULTC 제어와 동일한 프로세스로 배전선로 전압강하를 보상해주는 역할을 하고 있는 것이다[4].

국내에 사용되고 있는 일반적인 SVR은 32개 탭으로 탭 간격이 0.625%이며, 기준 전압의 ±10% 범에서 전압제어가 가능하다[13].

제 3 장 배전계통 현상 및 문제점 확인

제 1 절 전력계통 현상 확인

국내 전력계통에서 KEPCO에 의해 구도심과 신규 택지지구에서 운영 되는 배전용 변전소의 변압기 사이에 무효전력, 역률, ULTC Tap Position의 운전현황을 비교해본 결과 큰 차이가 발생하고 있음을 그림 3.1.1과 같이 확인 할 수 있다.



그림 3.1.1 구도심과 신규 택지지구 변압기 운전 Data

신규 택지지구 변압기를 기준으로 위 현상에 대한 직관적 해석을 해보 면, 배전계통에서의 어떠한 원인에 의해 용량성 무효전력이 발생하고 있 고 그 영향으로 변압기 역률저하와 배전계통 전압이 상승하게 되어 ULTC 운전 Tap을 하강시켜 모선전압을 제어하고 있다고 볼 수 있다. 위 현상이 지속될 경우 변압기 측면에서는 발생된 무효전력 만큼이 손 실로 작용해 부하 공급 능력을 저하시키고 온도상승에 의해 절연물과 변 압기 자체의 수명을 저하시키는 결과를 불러온다. 또한 배전계통 측면에 서는 제1장에서 기술한 계통전압 유지범위를 초과하게 되어 고객에게 공급되는 전력 품질을 저하시키고 과전압으로 인해 심각한 사회적 문제 를 발생시킬 수 있다.

현재까지는 위 현상에 대한 명확한 원인 규명과 대책에 대한 검토가 이루어지지 않은 상황이라 문제점 해결을 위한 연구가 필요한 시점이다.

1. 지역별 변압기 운전Data 비교 [구도심 vs 택지지구]

앞에서 거론한 공급 지역별 변압기 운전 특성이 달라지는 현상의 원인 을 분석하기 위해 우선 한전에서 운영중인 배전용 변전소의 변압기 운전 Data를 조사하였다. 표 3.1.1은 구도심지역에 부하를 공급하는 154kV 변압기 운전 Data를 주중과 주말로 구분하여 조사한 자료이다[14].

표에서 보는바와 같이 변압기 운영특성에서 전반적으로 유도성 (Lagging) 무효전력이 발생하고 있으며 그로 인해 역률이 90% 초반을 상회하고 있음을 확인할 수 있다. 무효전력과 유효전력 모두 주말대비 주중 근로시간에 증가하는 양상을 보이고 있으며 부하 증가에 따라 역률 또한 저하되는 것을 확인할 수 있다. ULTC Tap Position은 각각의 부 하공급 및 배전선로 특성에 따라 전압강하를 보상하기 위해 주말 평균 10Tap에서 주중 평균 12Tap으로 높게 운영되는 것을 확인할 수 있다.

구분	변압기	유효전력 (MW)	무효전력 (MVAR)	역률 (PF)	23kV 모선전압	ULTC Tap
	#1	31.7	13.8	92	23.1	12
구도심	#2	31.9	15.7	90	23.0	13
면신소 (주중)	#3	30.4	12.7	92	23.2	13
	#4	33.2	18.4	87	23.3	14
	#1	7.0	-0.3	100	22.8	7
구도심	#2	12.9	-0.5	100	23.3	9
· 컨선조 (일요일)	#3	10.7	-1.7	98	23.1	8
	#4	7.9	0	100	23.2	8

표 3.1.1 구도심지 부하공급 변압기 운전Data

결론적으로 부하가 증가함에 따라 변압기 내부 임피던스 및 선로 임피 던스에 의해 전압강하가 발생하고 있으며 그에 대한 보상을 위해 ULTC Tap 상승 제어를 통해 배전계통 전압을 높여 송출하고 있는 것이다. 위 와 같은 특성은 공단지역과 구도심지 공급 변전소에서 공통된 특성으로 나타나고 있다.

다음으로 표 3.1.2는 정부의 신도시 개발정책에 의해 계획된 신규택지 지구에 전력을 공급중인 154kV 변압기 운전 Data를 주중과 주말로 구 분하여 조사한 자료이다.

변전소	변압기	유효전력 (MW)	무효전력 (MVAR)	역률 (PF)	23kV 모선전압	ULTC Tap
	#1	13.2	-10.5	78	22.9	4
신규 태기기그	#2	18	-13	81	23.4	5
역시지기 (주중)	#3	10.5	-11.4	68	22.7	4
	#4	9.2	-3.7	92	23.1	6
	#1	10.4	-11.8	72	22.9	3
신규 태기기그	#3	15.6	-11.4	81	22.9	4
역시시기 (일요일)	#2	11.2	-11.4	70	22.8	4
	#4	11.5	-4.7	93	23.0	6

표 3.1.2 신규 택지지구 부하공급 변압기 운전Data

표 3.1.2를 통해 신규 택지지구에 부하를 공급중인 변압기 부하특성을 보면 용량성(Leading) 무효전력 특성이 매우 높게 나타나고 그로인해 역률 또한 저하되어 있는 것을 확인할 수 있다. 주말대비 주중 부하는 유효전력과 무효전력 모두 구도심 공급 변압기에 비교할 때 상대적으로 그 편차가 적은 것을 확인할 수 있다. 신도시 아파트 지역 중심의 부하 구성으로 인해 주중과 주말 부하 차이가 적은 것으로 추정된다. ULTC Tap Position은 주중 평균 7Tap으로 낮게 형성되고 주말 부하가 적어 진 상태에서는 더욱 낮아져 최저 3Tap까지 운영되는 것을 확인할 수 있다[14].

결론적으로 신규 택지지구에 부하를 공급하는 변압기의 경우 용량성 무효전력에 의해 역률이 저하되고 배전계통 전압이 상승하는 현상을 보 이고 있으며 이를 상쇄하기 위해 변압기 ULTC Tap Position을 낮춰 변압기 권수비를 제어하고 있다. 이와 같은 현상은 유효전력 부하가 상 대적으로 적은 경부하 시 더 커지는 것을 확인할 수 있다.

2. 배전선로 증설 시 변압기 운전 Data 변화

다음으로 표 3.1.3은 구도심과 신규 택지지구의 부하증가에 의해 배전선로가 증설된 경우의 운전 Data 변화를 비교한 자료이다. 두 지역은 기존에 배전선로 3회선이 운전중에 있었고 각각 3회선이 신설되어 변압기 공급회선이 6회선으로 증가되었고 그로인해 변압기 유효전력은 약 12MW에서 16MW로 약 4MW 증가 되었다.

구 분	배전선로 증설전(3회선)				배전선로 증설 후(6회선)			
	전압 (kV)	유효 전력 (MW)	무효 전력 (MW)	ULTC Tap	전압 (kV)	유효 전력 (MW)	무효 전력 (MW)	ULTC Tap
일반 지역	23.0	12	4.1	10	22.8 (▼ 0.23)	16	5.1	11
신도시 지역	23.0	12	-5.2	6	23.4 (▲0.4)	16	-8.6	4

표 3.1.3 배전선로 3회선 신설에 의한 변압기 운전 Data 변화

두 변압기 무효전력의 경우 부하증설 이전에도 각각 유도성과 용량성 의 상반된 특성을 각각 갖고 있었으며 증설 이후에는 그 차이가 더욱 커 진 것을 확인할 수 있다. ULTC Tap Position 또한 유사한 유효전력을 공급중임에도 증설 전 10Tap / 6Tap으로 4Tap 차를 보이던 것이 증 설 이후 일반지역의 경우 부하증가에 의해 전압강하가 커져 11Tap으로, 신규 택지지구 변압기의 경우 오히려 전압이 상승에 4Tap으로 권수비 를 낮춰 전압을 제어한 것을 확인할 수 있다. 일반적인 154kV 변압기의 Tap간 전압 차이가 1.25%임을 적용할 경우 두 변압기의 23kV 모선전 압 차이는 2kV에 이르게 됨을 확인할 수 있다. 배전 고압계통 전압유지 범위가 경부하 22.0kV, 첨두부하 : 23.9kV 인점을 감안하면 2kV 전압 의 크기를 실감할 수 있다. 결론적으로 각 지역의 3회선 증설이후 무효 전력과 ULTC Tap Position의 차이가 더 커져 서로 다른 부하 특성이 심화되었음을 운전 Data 상으로 확인할 수 있다.

제 2 절 전력계통 문제점 확인

제1절을 통해 현재 국내 전력계통 배전용 변전소에서 발생하는 현상 에 대한 Data를 조사하였다. 이 현상을 재확인 하자면 신규 택지지구에 서 운영되어지는 변압기는 부하를 공급중인 배전계통에서의 어떠한 원인 에 의해 용량성 무효전력이 크게 발생하고 있으며 그 영향으로 변압기의 역률이 -70 ~ -80%까지 저하되고 배전계통 전압상승을 유발시키고 있 다. 위 현상이 전력계통상에 지속적으로 영향을 미칠 경우 우선 용량성 무효전력 손실에 의해 154kV 45/60MVA 변압기의 공급 가능 용량을 저감시켜 변압기 운영 경제성을 저하시키는 결과를 초래하게 된다. 또한 변압기에서 공급되는 무효전력은 열적 손실로 작용되어 절연물 및 본체 의 온도상승을 발생시켜 변압기 수명저하에 영향을 미치게 된다.

배전계통 전압관리 측면의 경우 실제 23kV 모선에서 계측되는 전압 은 구도심 변압기와 신규 택지지구 변압기간에 차이가 없지만 ULTC Tap Position의 경우 구도심 11Tap. 신규 택지지구 4Tap으로 7Tap정 도를 낮춰서 운영하고 있다. 154kV 변압기의 Tap간 전압 차이 고려 시 두 지역 모선전압 차이는 2kV에 이르게 되어 배전계통 전압유지 기준을 초과하게 됨을 알 수 있다. 신규 택지지구 변압기는 2kV의 전압 상승을 억제하기 위해 ULTC Tap을 낮춰 4Tap으로 운전하고 있는 것이다. 만 약 이 상황에서 배전 선로가 추가로 증설되어 전압 상승이 더 발생한다 면 변압기에서 전압을 제어할 수 있는 여유도는 약 0.8kV 만 남게 된 다. 이 의미는 자칫 과전압에 의해 고객에게 공급되는 전력의 품질을 심 각하게 저하시킬 수 있게 된다는 것이다. 이 배전계통 전압 상승 현상은 배전선로가 증가할수록 그 현상이 심화되기 때문에 경우에 따라서는 배 전선로 신규 인출이 계통 전압상승의 문제로 인해 제한되는 상황이 벌어 질 수 있게 되는 것이다. 국내 전력계통에서 154kV 주변압기의 배전선 로 인출가능 회선은 표 3.2.1과 같지만 배전계통 전압 문제로 인해 변압 기를 신규로 증설해야하는 상황까지도 발생할 수 있는 것이다[15].
선로기준용량 1개 뱅크용량	10,000kVA	15,000kVA
45/60MVA	7	5

표 3.2.1 주변압기 용량 및 선로기준용량별 배전선로수

제 3 절 배전계통 전압상승 원인 검토

구도심 지역과 신규 택지지구에서 운영되는 변압기의 운전 Data는 앞 에서 살펴본 바와 같이 변압기 무효전력, 역률, 배전계통 전압 측면에서 확연한 차이를 드러내고 있다. 배전계통에 과도하게 투입된 용량성 무효 전력에 의한 이 현상의 원인이 될 요소들을 추정해 보자면 변압기 특성, 분산전원(DG) 연계, Sh.C 과보상, 부하특성, 배전계통 지중화를 고려해 볼 수 있다.

위의 요소들을 한 가지씩 살펴보자면 변압기 특성의 경우 한전에서 제 시한 표준 규격에 맞춰져 특성 임피던스 까지도 거의 유사한 값으로 제 작되기 때문에 두 지역 변압기 Data의 차이를 발생시킬 수 없었다. 분산전원(DG)의 경우 일부 배전선로에 태양광 발전 병렬운전을 하고 있 었지만 그 양이 미미하고 수용되지 않은 선로 비중이 월등히 많아 이 또 한 변수로 작용할 수 없었다.

Sh.C의 경우 배전계통에 많은 양이 투입되어 있다면 위와 같은 용량성 무효전력 과보상과 전압 상승을 발생시킬 원인이 될 수 있지만 해당 변 전소들을 조사한 결과 수도권 지역의 특성상 송변전 그리고 배전계통에 서도 투입된 Sh.C은 전혀 없는 상태였다.

배전부하 특성의 경우 신규 택지지구는 주로 가정용 부하가 밀집되어 있는 반면 구도심 지역은 산업용, 공장용, 가정용 부하가 혼재되어 있어 일부 차이는 보일 수 있지만 용량성 무효전력을 발생시키는 현상은 설명 이 어렵다. 표 3.2.1은 산업용과 가정용 부하로 주로 사용되는 모터 및 가전제품에 대한 일반적인 부하에 대한 역률 특성을 제시함으로서 위 주 장을 뒷받침하고 있다. 표에서 확인되는 바와 같이 부하별 차이가 있긴 하지만 인덕턴스 성분에 의해 공통된 지상(lagging) 무효전력 특성을 보 이는 것을 확인할 수 있다[8].

Type of Load	Power Factor(lagging)		
산업용 대형 모터	0.89		
산업용 소형 모터	0.83		
냉장고	0.84		
Pump(cool/heat)	0.81/0.84		
식기세척기	0.99		
세탁기	0.65		
건조기	0.99		
TV	0.77		

표 3.2.2 부하별 역률 특성

이제 배전계통에서 발생하고 있는 용량성 무효전력과 전압상승의 주요 원인이 될 요소는 배전계통의 지중화율 증가만을 남겨놓게 되었다. 지금 까지 전력계통을 운영하면서 주목하지 않았던 배전선로의 구성방식이 전 체 계통에 영향을 주고 있음이 추측되고 있는 것이다.

본 논문의 이후 부분은 배전계통 지중화율 증가 현황과 그로인한 용량 성 무효전력 증가의 영향성에 대한 자료조사, 그리고 그와 관련한 이론 적 검증과 사례연구 결과를 제시하였다.

제 4 장 배전 지중화율 증가 영향 분석

제 1 절 배전계통 지중화 현황 분석

전력케이블은 1812년 러시아에서 광산을 폭발시키는 용도로 최초 개발 된 이후 1882년 토마스 에디슨에 의해 DC케이블을 뉴욕 Pearl Street 에 적용하면서 개발과 활용이 가속화되기 시작하였고 2000년대 이후 500kV 이상급 장거리 선로에 AC XLPE 케이블과 HVDC 케이블이 개 발되어 폭넓게 활용되고 있다[16]. 국내 배전계통의 지중케이블 적용은 1929년 당인리 화력발전소 건설당시 당인리-영등포, 아현동-순화동 구 간을 시작으로 배전계통의 지중케이블 시공이 시작되었고 1973년 광화 문-효자동 구간을 기존 가공배전선로에서 지중케이블로 변경하며 지중 화 변경공사가 시작되었다.

1. 배전선로 지중화 현황

배전계통에서 적용하는 배전선로의 간선과 지선은 가공선로 또는 지중 케이블의 형태로 도로를 따라 설치된다. 지중케이블 공사 비용은 가공선 로 방식보다 설치비용이 약 10배 가량 더 소요되는 단점이 있음에도 외 물 접촉 및 일기 변화에 의한 고장을 낮출 수 있기 때문에 전력공급의 신뢰도가 높다. 또한 도시 미관상 유리하기 때문에 민원 발생의 소지가 없다는 장점을 갖고 있다. 일반적으로 부하밀도가 낮은 지역의 배전계통 은 보통 전주 위에 배전용 변압기, 퓨즈, 스위치 및 기타설비를 구축한 가공선로 방식을 채용하고 있다. 이와 다르게 부하밀도가 높은 도심지 또는 신규 택지지구 등 계획도시 지역의 경우에는 배전용 변압기와 개폐 장치를 지상 및 지중에 설치한 지중케이블 방식을 채용하고 있는 것이 일반적이다.

실제로 서울을 비롯한 광역시의 경우 위와 같은 지중케이블의 장점으 로 인해 기존 구도심 재생사업과 계획도시 확장 사업에 배전망을 지중으 로 구성하는 경우가 대부분이다.

-7 H	고	지중화율		
· 「 亡	가공 (c-m)	지중 (c-m)	합계 (c-m)	(%)
서울특별시	4,279,944	6,354,807	10,634,751	59.75
부산광역시	3,207,133	2,250,336	5,457,469	41.23
대구광역시	3,155,660	1,568,670	4,724,330	33.20
인천광역시	4,073,210	2,787,845	6,861,055	40.63
광주광역시	2,013,760	1,141,447	3,155,207	36.17
대전광역시	1,490,788	1,840,641	3,331,429	55.25

표 4.1.1 국내 주요 대도시 배전계통 지중화율

표 4.1.1은 서울 및 주요 광역시의 지중화율을 나타낸 것으로 대도시 를 중심으로 배전계통의 지중화가 지속적으로 확대되고 있음을 확인할 수 있다.

동일 지자체 내에서도 도시화 및 산업화 추진 계획에 따라 배전계통의 선로 구성 방식은 많은 차이를 드러내게 된다. 표 4.1.2는 인천광역시의 일부 행정구역별 지중화율을 나타낸 것으로 경제자유구역 송도 신도시를 포함하는 연수구의 경우 타 지역 대비 지중화율이 월등히 높은 것을 확 인할 수 있다.

7 4	고	지중화율			
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	가공 (c-m)	지중 (c-m)	합계 (c-m)	(%)	
서 구	756,375	567,425	1,323,800	42.86	
중 구	275,502	376,537	652,039	57.74	
남동구	412,174	506,927	919,101	55.15	
부평구	317,246	269,192	586,438	45.90	
연수구	60,067	686,869	746,936	91.95	

표 4.1.2 인천지역 배전계통 지중화율

위 자료에서 확인할 수 있듯이 정부정책 등에 의한 도시화와 신규 택 지지구 구성이 확대됨에 따라 과거와 달리 배전계통의 지중화가 확대되 고 있음을 확인할 수 있다. 또한 최근에는 구도심 지역의 노후설비 교체 시에도 도시미관과 주민들과의 마찰을 고려해 지중설비로 교체하는 사례 가 늘어나고 있어 배전설비 지중화는 가속화 될 것으로 예상된다.

2. 지역별 변압기 배전선로 지중화율 비교

배전선로 구성방식에 따른 주변압기 영향을 보다 정확히 확인하기 위해 표 4.1.3은 동일한 배전용 변전소 내에서 운영하는 154kV 변압기 4Bank 각각의 지중화율을 비교한 자료이다.

ਸੀ 01-7]	고입	기즈치아		
- 변합기	가공	지중	합계	시궁와귤
#1M.Tr	9.1	24.16	33.26	72.64%
#2M.Tr	21.7	43.4	65.1	66.67%
#3M.Tr	8.7	48.7	57.4	84.84%
#4M.Tr	64.4	11.4	75.8	15.04%

표 4.1.3 장기변전소 변압기별 지중화율

표에서 확인되는 바와 같이 동일한 변전소에서 운영되고 있는 변압기 라고 할지라도 공급 지역에 따라 가공/지중선로 운전현황의 차이가 현격 히 발생함을 알 수 있다. 특히 #3M.Tr의 경우 신도시 지역 아파트 단 지에 부하를 공급하다보니 다른 변압기보다 월등히 지중화율이 높음을 확인할 수 있고 이로 인해 변압기의 무효전력, 역률, 전압분포의 특성이 전혀 다르게 나타나게 된다. 이와 달리 구도심 지역에 배전부하를 주로 공급하는 #4M.Tr은 반대의 특성을 보임을 확인할 수 있다.

공급 지역을 달리하는 변압기의 무효전력, 역률, 전압상승의 문제와 지중화율과의 상관관계를 보다 정확히 확인하기 위해 표 3.1.1과 표 3.1.2 에서 제시한 구도심과 신규 택지지구 운전 변압기의 배전선로 구 성 Data를 아래 표 4.1.4와 같이 조사하였다.

구 분	변압기	가공선로	지중선로	전체 긍장	지중화율(%)
구도심	#1	34.2	6.4	40.4	15.8
	#2	52.6	8.3	60.9	13.6
	#3	67.6	8.26	75.9	10.9
	#4	45.1	2.84	47.9	5.9
신규 택지지구	#1	24.3	133.2	157.3	84.5
	#2	0.2	35.5	35.7	99.4
	#3	9.4	53.7 63.1 85		85.1
	#4	5	31.5	36.5	86.3

표 4.1.4 지역별 변압기 배전선로 지중화율 비교

표 4.1.4를 통해 구도심과 신규 택지지구 지역의 변압기에서 인출된 배

전선로 지중화율에 극명한 차이가 있음을 확인할 수 있었고 지중화율 증 가와 무효전력 및 배전계통 전압의 상관관계를 간접적으로 검증할 수 있 었다. 결과적으로 지중케이블 커패시턴스 성분의 용량성 무효전력이 증 가되어 전력계통에 영향을 주고 있음을 추론할 수 있었다.

제 2 절 기존 배전계통 등가회로

제1절에서는 실제 국내 전력계통에서 운영중인 배전용 변전소의 변압 기와 배전선로 지중화율을 비교함으로써 배전계통의 지중화율 변화가 전 력계통에 영향을 줄 것이라는 가설에 대한 간접적 검증을 수행하였다. 이제 배전선로에 대한 선로정수와 등가모델을 통해 용량성 무효전력 발 생과 배전계통 전압 상승에 대한 이론적 접근을 수행하려 한다.

전력선 등가모델에 적용하는 단거리 및 중거리 등가모델은 그림 4.2.1 과 같이 ABCD 4단자 정수를 이용하여 근사적으로 표현할 수 있다.



그림 4.2.1 전력선 4단자 등가모델

송전선로를 송전단과 수전단에 대해서 해석할 경우 송전단의 전압

(V_s)과 전류(I_s) 그리고 수전단의 전압(V_r)과 전류(I_r)로 아래 식 4.2.1
 과 같이 표현 가능하고

$$Vs = A Vr + BIr$$
(4.2.1)
$$Is = CVr + DIr$$

이를 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} Vs\\ Is \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B\\ CD \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vr\\ Ir \end{bmatrix} \quad {}^{(4.2.2)}$$

여기서 A,B,C,D는 선로정수 R, L, C, G에 의해 결정되는 파라미터로 선로 긍장 및 구성방식(가공선로, 지중케이블), 도체특성, 선로 배열간격 , 포설방식, 케이블 절연체 유전율, 선로 가닥수(Bundle) 등에 의해 그 값이 정의된다[17].

$$z = R + jwL$$
 단위길이당직렬임피던스 $[\Omega/m]$
 $y = G + jwC$ 단위길이당병렬어드미턴스 $[S/m]$
 $Z = zl$ 선로전체임피던스 $[\Omega]$
 $Y = yl$ 선로전체임피던스 $[S]$

표 4.2.1 전력선 선로정수

일반적으로 선로길이 80km 미만인 60Hz 선로의 경우 선로 전체에 분포되어 있는 임피던스를 그림 4.2.2와 같이 하나의 집중 직렬 임피던 스로 근사화한 형태로 적용하고 있다. 이와 같은 간략화된 등가모델은 단거리 전력선 선로정수의 경우 선로 직렬 임피던스인 저항(R)과 인덕 턴스(L) 성분이 선로와 대지간의 병렬 어드미턴스 성분보다 매우 크다 는 전제하에 표현이 가능하다. 배전선로 또한 이 단거리 선로 등가모델 을 적용해 ULTC와 SVR 제어기기에서 LDC Logic을 통해 전압 강하를 예측하고 있으며 보호계전기 설정치 산출에도 적용하고 있다.



그림 4.2.2 단거리 전력선 및 배전선로 등가모델

단거리 선로에 대한 4단자 파라미터는 KVL과 KCL에 의해 아래와 같 은 수식과 행렬로 표현 가능하다.

$$Vs = Vr + ZIr \qquad (4.2.3)$$

$$Is = Ir$$

$$\begin{bmatrix} Vs\\ Is \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \ Z\\ 0 \ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vr\\ Ir \end{bmatrix}$$
(4.2.4)

식 4.2.3을 통해 송전단과 수전단 전압 관계를 정리 해보면 선로 거리 l 에서 송전단과 수전단의 전압 관계는 아래 식 4.2.5와 같이 정의된다.

$$Vs = Vr + ZIr$$

$$= Vr + (r + jwL_0) lIr$$
(4.2.5)

일반적인 부하전류 Ir은 본 연구 3장에서 살펴본 바와 같이 지상 (lagging) 특성을 보이기 때문에 송전단과 수전단 전압 벡터도는 그림 4.2.3과 같이 표현 가능하다. 이 벡터도와 식 4.2.5에서 보는바와 같이 기존에 배전선로 등가모델에 적용하는 단거리 등가모델을 통해서는 배전 계통의 용량성 무효전력 발생과 전압 상승에 대한 해석이 불가능함을 확 인할 수 있다.



그림 4.2.3 단거리 배전선로 등가모델 전압 벡터도

제 3절 배전선로 선로정수 산출

제 2 절에서 살펴본 바와 같이 기존에 배전선로 등가모델에 적용하고 있는 단거리 모델을 통해서는 가공으로 구성된 배전계통은 해석이 가능 할지 모르나 지중케이블로 구성된 배전계통에 대한 해석에 적용하기에는 적절하지 못하다는 사실이 확인 되었다.

실제 선로 지중화를 반영한 배전계통 등가모델을 제안하기 위해 PSCAD Tool을 활용해 가공선로와 지중케이블의 선로정수를 산출해 보 았다. 각각의 선로 Spec은 실제 배전계통 구성 시 적용하는 종류로 가 공선로는 그림 4.3.1과 같이 ACSR/AW-OC(58㎡)를 지중케이블은 그 림 4.3.2와 같이 TR-CNCE-W를 대상으로 하였다.



그림 4.3.1 가공배전선로 모델링



그림 4.3.2 지중배전선로 모델링

위의 그림 4.3.1와 4.3.2를 통해 대략적으로 구성한 가공선로와 지중 선로의 선로정수 산출한 결과는 표 4.3.1과 같다.

구 분	선로정수	단위	가공선로 ACSR/AW -OC	지중케이블 TR-CNCE -W	비고		
	Resistance	Rsq[pu]	0.92	1.41	1.5배↑		
Positive Sequence	Reactance	Xsq[pu]	1.19	0.72	1.7배↓		
	Susceptance	Bsq[pu]	1.41E-04	6.9E-03	49배↑		
Zero Sequence	Resistance	Rsq[pu]	1.41	1.74	1.2배↑		
	Reactance	Xsq[pu]	2.94	3.52	1.2배↑		
	Susceptance	Bsq[pu]	9.87E-05	6.92E-03	70배↑		
≫ Base of Per-Unit Quantities : 22.90 kV (L-L), 100 MVA							

표 4.3.1 배전선로 Type별 선로정수 산출결과

선로정수 산출결과를 표 4.3.3을 통해 비교해보면 지중케이블로 배전 선로를 구성할 경우 직렬성분인 저항과 리액턴스는 가공선로 대비 2배 이내의 변화를 보인 반면 서셉턴스의 경우는 50~70배 증가된 것을 확 인할 수 있다. 이 결과값을 통해 판단할 때 지중케이블로 구성된 배전선 로는 가공선로와 동일한 형태의 단거리 전력선 등가모델 적용이 상대적 으로 부적합하다는 사실을 다시 한번 확인할 수 있다.

위와 같은 선로정수 결과가 산출된 배경에는 가공선로와 지중케이블의 구조적인 차이점에서 기인한 것으로 추정된다. 선로의 인덕턴스와 커패 시턴스를 결정짓는 주요 요소는 선로 도체의 반경 "r"과 상간 그리고 중성선간의 거리 "D"로 지중케이블의 경우 도체와 중성선간에 유전체 를 통해 절연을 유지하고 있어 가공선로 대비 그 거리가 매우 가깝기 때 문에 커패시턴스 값이 급격히 증가하게 된다. 또한 유전체의 비유전율에 의한 영향 또한 커패시턴스 증가의 영향으로 작용했을 것이다.



그림 4.3.3 배전선로 Type 별 구조

제 4절 배전계통 지중화를 고려한 등가회로 제안

지중케이블 구성 비율이 높아진 배전계통을 등가모델을 통해 표현하기 위해서는 직렬 임피던스와 함께 케이블 절연체에 의한 커패시턴스 증가 분을 표현해줄 필요가 있음을 제 3 절에서의 선로정수 산출 결과를 통 해 확인했다. 특히 배전계통의 선로가 길고 지선과 간선이 복잡하게 구 성된 경우 커패시턴스 성분이 증가하게 되어 그 영향은 더욱 커질 것으 로 추정된다.

배전계통에서 발생하는 용량성 무효전력과 전압 상승 그리고 선로정수 산출 결과를 종합해 새로운 배전선로 등가모델에 지중케이블의 커패시턴 스 영향을 함께 반영할 수 있는 그림 4.3.1의 π(Pi) 등가모델을 제안하 고자 한다. π(Pi) 등가모델은 선로길이 80~250km 미만 중거리 전력 선에서 선로 길이 증가에 의한 정전용량을 반영하기 위해 적용된 모델로 전원단과 부하단에 어드미턴스를 양분한 집중정수회로로 표현하고 있다 [2].

Z = zl $+ 0 \qquad |s \qquad |r \qquad + 0 \qquad$

그림 4.4.1 중거리 선로를 근사적으로 표현한 *π*(Pi) 등가모델

π (Pi) 등가모델에 대한 4단자 파라미터를 구하기 위해 KVL을 적용하면 송전단 전압 Vs는 식4.4.1과 같이 정의된다[17].

$$Vs = Vr + Z(Ir + \frac{Vr Y}{2}) \qquad (4.4.1)$$
$$= (1 + \frac{ZY}{2}) Vr + ZIr$$

송전단에서 KCL을 적용하면 송전단 전류 Is는 식 4.4.2와 같이 정의 되고

$$Is = Ir + \frac{Vr Y}{2} + \frac{Vs Y}{2} \quad (4.4.2)$$

식 (4.4.1)에서 Vs를 식 (4.4.2)에 대입하면

$$Is = Ir + \frac{VrY}{2} + \left[\left(1 + \frac{YZ}{2} \right) Vr + ZIr \right] \frac{Y}{2} \quad (4.4.3)$$
$$= Y\left(1 + \frac{YZ}{4} \right) Vr + \left(1 + \frac{YZ}{2} \right) Ir$$

식 (4.4.1)와 식 (4.4.3)를 행렬로 표현하면 식 (4.4.4)와 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} Vs\\ Is \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + \frac{YZ}{2}) & Z\\ Y(1 + \frac{YZ}{4}) & (1 + \frac{YZ}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vr\\ Ir \end{bmatrix} \quad (4.4.4)$$

선로 임피던스와 서섭턴스는 선로 거리(l)에서 아래와 같이 정의되어

$$Z = (r + jwL_o)l, \quad Y = jwC_0l$$
(4.4.5)

식(4.4.1)로부터 전압강하 △V를 식 (4.4.6)으로 표현 가능하다.

$$\Delta V = Vs - Vr = \frac{ZY}{2} Vr + ZIr \qquad (4.4.6)$$
$$= \frac{1}{2} (r + jwL_0) jwC_0 l^2 Vr + ZIr$$
$$= (ZIr + j\frac{1}{2} rwC_0 l^2 Vr) - \frac{1}{2} w^2 L_0 C_0 l^2 Vr$$

위 식에서 단위 길이당 선로의 저항 r이 인덕턴스와 서셉턴스에 비해 작고 경부하로 인해 부하전류 Ir이 작을 경우 송전단과 수전단의 전압의 음의 값을 갖게 되어 배전계통 전압이 상승하는 현상이 발생할 수 있음 을 확인할 수 있다. 이때 배전계통 송전단과 수전단 전압 사이의 벡터도 는 그림 4.4.2와 같이 표현 가능하다.



그림 4.4.2 π(Pi) 등가모델을 적용한 전압 벡터도

송전단과 수전단의 전압강하 예측을 위한 식 4.4.6과 그림 4.4.2의 벡 터도를 통해 배전계통 지중화를 반영한 등가모델로 π(Pi) 등가모델 적 용이 가능함을 이론적으로 확인하였다.

다음 장에서는 지금까지 연구한 배전선로 지중화율 증가에 따른 배전계 통에서의 용량성 무효전력 증가와 전압상승에 대한 현상을 실제 배전계 통을 모의한 사례연구를 통해 재현하고자 한다.

제 5 장 사례연구

제 1 절 연구대상 배전계통

사례연구에서는 지금까지 본 논문에서 제시한 배전선로 지중화율 증가 에 의한 용량성 무효전력 발생과 역률저하 그리고 배전계통 전압상승을 검증하기 위해 영종도 신도시 지역에 부하를 공급하는 배전선로 1회선 을 모의하여 구성하였다. 사례연구에 본 선로를 적용한 이유는 도서지역 이라는 특수성에 의해 배전선로 연결이 다른 지역 대비해서 그 복잡성이 덜하고 신규 택지지구 공급선로다보니 배전선로 전체 구간이 100% 지 중케이블로 구성되어 있었다. 또한 구도심과 달리 부하 특성이 주로 아 파트 위주의 주택용 부하로 편성되어 본 연구 결과를 적용해보기에 적합 하다고 판단되었기 때문이다.

본 사례연구의 대상 전력계통은 154kV 송전선로 2회선으로 전력을 수 전받아 154 / 23kV 강압용 변압기로 전압을 변성하여 배전선로를 통해 수용가에 전력을 공급하고 있으며 변압기의 실제 부하는 유효전력 13MW, 무효전력 -10 MVAR, 역률 -70%, ULTC 5Tap 으로 계측되어 지고 있다. 배전선로의 주간선 길이는 8km이고 인출된 간선과 지선은 배전계통의 복잡성에 의해 고압과 저압 모두를 정확히 표현하기는 불가 능하기 때문에 본 연구에서는 고압 부하만을 표현하는 방식으로 1개 부 하인 경우와 5개 부하인 경우로 구분하여 이에 따라 간선 인출 회선수 를 변경하여 적용하였다. 사례연구에는 Matlab Simulink를 활용하여 그 림 5.1.1과 같이 대상 배전계통을 간략화시켜 모의하였다.



그림 5.1.1 사례연구 등가모델

사례연구 과정에서 적용한 변수는 배전선로 등가모델에 선로정수 커패 시턴스 성분의 반영여부(단거리 모델과 π등가모델 비교), 배전계통의 고압간선 회선수, 배전선로 긍장 및 부하 증가를 각각 적용하여 표 5.1.1과 같이 Case1~Case8까지 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통해 얻어진 결과 Data는 실제 계통에서 측정된 주변압 기 부하, 역률, 23kV 모선 및 배전계통 전압 Data와 비교함으로써 본 연구의 타당성을 검증하고 배전선로 간선 인출 회선, 선로 긍장 변화, 배전 부하가 변동될 때 어떠한 영향이 발생하게 되는지 비교·분석 하였 다.

	배전 가서		가서		부하량		
구 분	등가모델	선로	회선	선로긍장	유효 MW	무효 MVAR	
Case1	단거리 모델	1회선	1회선	8km	13	+4	
Case2	π 모델	1회선	1회선	8km	13	+4	
Case3	π 모델	1회선	5회선	18km	13	+4	
Case4	단거리 모델	1회선	5회선	18km	13	+4	
Case5	π 모델	1회선	5회선	36km	13	+4	
Case6	π 모델	1회선	5회선	18km	26	+8	
Case7	π 모델	2회선	10회선	9km+9km	13	+4	
Case8	π 모델	2회선	10회선	18km+18km	13	+4	
Case9	π 모델	2회선	10회선	18km+18km	26	+8	

표 5.1.1 시뮬레이션 변수(등가모델 Type, 간선 회선수, 긍장, 부하)

제 2 절 사례연구 결과

사례연구에서 변수 설증을 달리한 Case1~4까지는 지중케이블로 구성 된 배전계통 모델링에 적합한 등가모델을 검증하기 위한 과정으로 그 결 과 Data는 표 5.2.1과 같다. 이때 배전선로 회선(1회선), 배전선로 부하 용량 (유효 13MW, 무효 4MVAR)은 고정되어 있고 적용한 변수는 커 패시턴스 성분 반영여부, 고압 간선 회선수(1회선 or 5회선) 적용 여부 이다.

7 4			결과 Data					
十 壬		회선	유효전력 MW	무효전력 MVAR	모선전압 kV	선로전압 kV		
Case1	단거리 모델	1회선	10.5	+3.9	22.3	19.1		
Case2	π 모델	1회선	11.6	-2.5	23.2	20.2		
Case3	π 모델	5회선	15.1	-12.0	24.5	23.1		
Case4	단거리 모델	5회선	11.3	+4.1	22.3	20.1		

표 5.2.1 시뮬레이션 결과1(Case1~4)

표 5.2.1의 결과 Data를 분석해볼 때 배전선로 등가모델에 단거리 모 델을 적용한 Case1과 Case4에서는 지중케이블로 구성된 계통에서 발생 하는 용량성 무효전력 증가와 배전계통 전압상승 현상에 대한 모의가 이 루어지지 않음을 확인할 수 있다.

현행 배전계통 전압 보상을 위해 ULTC와 SVR의 LDC 로직에 적용하는 단거리 등가모델에서는 선로정수 커패시턴스 성분을 반영하지 않기 때문에 배전계통 전압 변동에 대한 정확한 예측이 이루어질 수 없음을 결과 Data로부터 확인할 수 있다.

배전선로 등가모델에 π (Pi) 등가모델을 적용한 Case2와 Case3의 시 뮬레이션 결과는 선로정수 커패시턴스 성분에 의해 용량성 무효전력이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 추가적으로 적용한 배전계통 간 선 반영 여부가 두 사례연구 Case의 결과값에 의미있는 차이를 가져온 것을 확인할 수 있었다. Case3의 경우 배전계통 모의 과정에서 실제 계 통과의 유사도를 높이기 위해 배전선로 간선과 부하를 5개소로 나눠 적 용하였고 결과적으로 전력케이블 길이와 병렬로 구성된 커패시턴스 성분 의 증가로 용량성 무효전력을 증가시켜 배전계통 전압을 상승시켰음을 추론할 수 있다. 배전선로의 지중화율 증가에 의한 무효전력과 전압분포 를 예측하기 위해서는 배전계통 간선 Data까지 반영되어야 보다 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. 다만 본 연구에서 배전 계통 고압과 저압 부하 구성의 복잡한 구성을 정확히 표현하지 못한 점 은 한계이자 아쉬움으로 작용할 수밖에 없었다.

실제 전력계통 운영Data와 가장 유사한 결과를 보인 Case3의 경우 변

압기 부하는 유효전력 15.1MW, 무효전력 -12MVAR, 진상 역률 78%(-0.78), 배전계통 모선전압은 24.5kV로 나타났다. 23kV 모선 전 압에 응동하여 전압을 제어하는 ULTC의 경우 앞서 언급한바와 같이 Tap간 전압 차이가 1.25% 임을 감안할 때 23.0kV의 기준전압 대비 5Tap이상의 ULTC 하강 제어가 필요함을 추정할 수 있다.

앞선 사례연구에서 π등가모델 적용의 타당성이 검증되었기 때문에 사례연구 Case5~8에서는 배전선로 등가모델을 π등가모델로 동일하게 적용하고 추가적인 변수를 반영하여 어떤 경우에 지중케이블에 의한 무 효전력 증가와 전압 상승이 심화되는지를 연구하였다. 적용한 변수는 배 전선로 인출 회선수, 선로 긍장 증가, 부하증가로 각 변수를 적용한 경 우 변압기의 무효전력과 배전계통 전압 변동에 어떤 영향이 나타나는지 를 모의 하였고 그 결과는 표 5.2.2의 결과 Data와 같다.

표 5.2.2의 결과 Data를 통해 확인할 수 있듯이 동일한 간선이 인출 된 조건에서 선로의 긍장이 늘어날 경우 용량성 무효전력과 배전계통 전 압이 증가하고 부하가 늘어날 경우엔 반대의 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 추가적으로 Case5와 Case8은 전체 선로 긍장과 부하가 동일 함에도 배전선로 인출 회선과 간선회선 수의 차이에 의해 무효전력과 전 압 분포에서 많은 차이가 발생하는 의미있는 결과를 확인할 수 있었다. 이는 지중케이블의 커패시턴스 성분이 배전선로 회선과 간선 회선 증가 에 따라 병렬 구성이 증가되어 나타난 것으로 추정되고 이 점을 고려할 때 배전선로 신설 또는 간선 증설 시 배전계통에 미치는 영향성을 검토 할 필요가 있음을 추론할 수 있다.

	배정가서				결과 Data			
구 분	· 매신 - 선로	간신 회선	선로긍장	MW	유효	무효	모선	선로
		,			전력	전력	전압	전압
					MW	MVAR	kV	kV
Case5	1회선	5회선	36km	13	25.3	-28.1	26.5	24.7
Case6	1회선	5회선	18km	26	24.6	-4.6	23.5	20.1
Case7	2회선	10회선	9km+9km	13	15.2	-13.2	24.7	24.1
Case8	2회선	10회선	18km+18km	13	21.6	-36.6	27.5	27.3
Case9	2회선	10회선	18km+18km	26	34.2	-24.6	26.1	24.6

표 5.2.2 시뮬레이션 결과2(Case5~9)

사례연구를 통해 지중케이블로 구성된 배전선로의 경우 선로정수 커패 시턴의 영향이 계통 무효전력과 전압변동에 크게 영향을 주는 요소임을 입증하였고 이를 고려하기 위해 배전계통 등가모델에 π등가모델을 적용 하여 부하와 전압에 대한 예측을 수행해야 함을 확인할 수 있었다. 또한 변압기에서 인출된 배전선로 회선과 고압 간선 그리고 지선이 복잡해지 고 선로 긍장이 길어진 경우, 그리고 계통 부하가 적은 상태에서 케이블 커패시턴스에 의한 영향이 크게 작용되어 변압기 용량성 무효전력 상승 과 역률 저하 그리고 배전계통 전압강하의 문제가 심화됨을 확인할 수 있었다.

제 3 절 Reactor 적용 효과 사례연구

배전선로 지중화율 증가에 의한 영향을 보상하고 계통 안정도를 강화 하기 위해 배전계통에 Reactor를 설치했을 경우를 상정하여 추가적인 사례연구를 수행하였다. 실제 국내 전력계통에서는 Sh.C만을 설치하여 전압 강하만 보상 할뿐 Reactor를 운전하는 경우가 없기 때문에 본 추 가 사례연구에서 Reactor 규격은 연구의 필요성에 따라 변경하여 설정 하였다. 사례연구를 위한 변수로는 앞서 리액터가 설치되지 않은 배전계 통 Data와 비교를 위해 리액터의 설치 위치를 그림 5.3.1과 같이 23kV 모선, 배전선로 중간 그리고 배전선로 말단으로 그 위치를 변화 시켰고 추가적으로 리액터 용량을 5MVAR와 10MVAR로 변화시켜 역률제어의 효과를 비교하였다.



그림 5.3.1 리액터 적용 효과 사례연구 구성

추가 사례연구의 결과는 표 5.3.1의 Data와 같이 배전계통에 Reactor 를 설치했을 경우 유도성 무효전력 공급을 통해 용량성 무효전력을 상쇄 시킬 수 있게 되기 때문에 변압기 부하의 여유도와 역률이 개선됨을 확 인할 수 있다. 또한 그로인해 배전계통 전압 상승도 완화되어 Reactor 설치 전 대비 모선전압과 선로 말단 전압이 안정화 된 것을 확인할 수 있다. 이 과정은 본 논문의 제 2장에서 Sh.C의 역률제어를 통한 전압 보상 원리에서 언급한 아래 식에 의해 전압 상승이 개선된 것으로 판단 된다.

$$\Delta V \approx \frac{RP + X(Q_L - Q_C)}{V_2}$$

간선 회선 선로긍장		부하	결과Data			
	MW	유효전력 MW	무효전력 MVAR	모선전압 kV	선로전압 kV	
비교대상	없음	없음	15.1	-12.0	24.5	23.1
추가1	23kV 모선	5MVAR	14.2	-6.3	23.7	22.3
추가2	배전선로	5MVAR	13.5	-7.0	23.8	22.0
추가3	부하단	5MVAR	13.6	-7.1	23.8	21.9
추가4	23kV 모선	10MVAR	12.7	-2.7	23.3	20.8

표 5.3.1 리액터 적용 효과 사례연구 결과

배전계통을 간략하게 반영한 본 사례연구의 모의 계통 조건하에서 Reactor 설치 위치를 23kV 모선, 선로중간, 부하측으로 변경하여 반영 한 변수의 영향은 결과 Data를 통해 판단해볼 때 미미한 것으로 확인됐 다. 다만 본 사례연구의 모의 계통이 실제 배전계통의 복잡성과 차이가 크기 때문에 이 부분에 대한 연구는 추가적으로 심도있게 다루어져야 보 다 정확한 결론을 내릴 수 있을 것으로 생각된다.

Reactor 공급 용량에 대한 결과의 영향은 직접적으로 상관관계를 보 이기 때문에 배전계통상에 필요한 용량을 사전검토 후 투입할 때 무효전 력 보상과 전압 안정도 개선에 많은 도움이 될 것으로 생각된다. 다만 실시간으로 부하가 변동하는 배전 부하의 특성을 고려할 때 기존에 개발 된 23kV FACTS 설비를 적용하기에는 어려움이 따를 것으로 판단된다. 부하변동에 응동함과 동시에 변압기 ULTC와 제어 협조가 이루어져야 배전계통 전압 안정화와 무효전력 보상이 동시에 충족될 것으로 생각되 기 때문이다.

제 6 장 결론

산업화, 도시화와 함께 적용되기 시작한 배전선로의 지중화는 고품질 전력에 대한 고객의 요구와 환경적 측면을 중시하는 최근의 트랜드와 맞 물려 지속적으로 증가하고 있다. 이와 같은 이유로 배전선로를 신규로 구성하는 경우뿐 아니라 노후된 기존 선로를 교체하는 경우에도 지중케 이블을 적용하고 있는 추세이다.

본 연구는 배전계통에서 의도치 않은 용량성 무효전력 증가와 전압상 승 현상을 주목해서 그 원인을 찾는 과정에서 시작되었다. 위 현상과 관 련해 전력계통에서 운영되는 자료를 수집하고 분석하는 과정에서 구도심 지역과 신규 택지지구의 주변압기 운전 특성이 상이하게 나타나고 있음 을 확인하였고 두 지역 주변압기가 공급하는 배전선로 구성과 지중화율 비교를 통해 상관관계가 있음을 추정할 수 있었다.

배전선로 지중화율 증가가 154kV 주변압기에서 계측되는 용량성 무 효전력 증가와 배전계통 전압 상승의 직접적인 원인이라는 가설을 설정 한 후 선로 타입별 선로정수를 산출한 결과 지중케이블로 구성된 배전선 로는 케이블의 물리적 구조와 절연체의 유전율에 의해 가공선로에 비해 선로 정수 중 커패시턴스 용량이 급격히 증가함을 확인 하였다.

연구를 수행하는 과정에서 현재 배전선로 등가모델로 적용하는 직렬 임피던스만을 고려한 단거리 전력선 모델은 지중케이블에 의한 용량성 무효전력 증가와 배전계통 전압 상승 현상을 반영할 수 없음을 확인 하였다. 본 연구에서는 이를 개선하기 위해 커패시턴스를 반영할 수 있는 중거리 선로에 적용하는 π(Pi) 등가모델 적용을 제안 하였고 이 등가모 델을 통해 배전계통의 경부하 시 전압 상승에 의한 문제가 발생할 수 있 음을 이론적으로 검증하였다.

사례연구에서는 지리적인 특성에 의해 모든 배전선로 구성이 지중케이 블로 설치된 영종도 신도시 지역의 배전계통을 대상으로 기존 단거리 선 로 등가모델을 적용한 경우와 본 연구에서 제안한 중거리 π(Pi) 등가모 델을 적용한 경우로 구분하여 시뮬레이션을 수행하였고 실제 전력계통 운영 Data와 비교함으로써 연구의 주장을 뒷받침 하였다. 이 과정에서 실제 배전계통을 모의할 주간선으로부터 인출된 간선의 회선수와 선로 길이가 증가할수록 더욱 많은 양의 커패시턴스 영향을 받고 그에 따라 용량성 무효전력 발생과 전압상승 문제가 심화될 수 있음을 확인할 수 있었다.

또한 추가 사례연구를 통해 배전계통에서의 용량성 무효전력의 영향을 보상하기 위해 23kV 리액터를 설치할 경우 역률제어의 효과로 인해 전 압과 무효전력의 증가를 제어할 수 있음을 간접적으로 확인할 수 있었 다. 이 경우 리액터의 설치 위치에 대한 영향 보다는 배전계통에서 발생 하는 진상 무효전력에 상응하여 적절한 용량을 투입할 필요가 있음을 확 인할 수 있었다. 다만 실시간으로 부하가 변동하는 배전계통의 특성에 최적화된 무효전력 보상설비에 대한 추가적인 연구와 23kV급 FACTS 설비의 개발이 필요함을 확인할 수 있었다. 사례연구에서 적용한 배전 모의계통은 실제 계통의 고압간선과 지선, 그리고 저압계통을 정확히 모의하기에는 무리가 있었다. 또한 각 선로별 부하특성을 정확히 반영할 수 없었다는 점이 연구의 한계로 작용할 수 있다. 그러나 본 연구 자체가 전력시스템에서 당연시 여기고 있던 기존 전력계통 운영방식의 문제점을 제기하고 그에 대한 근거자료를 제시한다 는 점에서 충분한 의미가 있을 것으로 생각된다. 다만 앞서 언급한 바와 같이 배전계통의 보다 정확한 모델링과 부하특성이 반영된다면 보다 심 도 있는 후속 연구가 가능할 것이고 그 결과를 통해 정확한 현상 파악과 문제점 확인 그리고 그 영향성이 예측 가능해질 것으로 생각된다. 그 연 구의 결과물은 1차적으로는 배전선로 증설시 변압기와 배전계통 영향성 을 고려하여 가공/지중 선로의 비율 조정에 활용될 수 있고 2차적으로는 배전계통 무효전력 보상을 위한 FACTS 설비 적용을 위한 연구의 시작 으로 이어질 수 있을 것이다.

전 세계적으로 배전계통에서의 FACTS 설비 시장 전망은 지속적으로 확대될 것으로 예상되어지고 있다[18]. 분산전원과 신재생 에너지원 수 용의 확대로 무효전력 공급의 필요성이 증가되고 있는 현 시점에서 국내 전력계통 또한 23kV급 FACTS 설비 도입에 대한 보다 심도 있는 검토 가 필요한 시점으로 생각된다. 다만 23kV급 FACTS 도입 시에는 실시 간으로 변하는 배전계통 부하특성에 응동할 수 있고 추가적으로 ULTC 권수비 제어와 전압제어 협조가 이루어져야 실제 계통에 적용이 가능할 것으로 생각된다.

국내 전력 시스템은 배전계통을 구분하여 운영한 이래 가공선로를 기

반으로한 등가모델을 적용하여 계통전압 예측과 보호 설정치 산출 등에 활용해 왔다. 과거 대부분의 배전계통이 가공으로 구성된 경우 큰 오류 없이 적용이 가능했지만 산업화, 도시화와 함께 지중화가 증가된 지금 시점에서는 곳곳에서 변화의 필요성이 확인되고 있다. 모든 분야에서와 마찬가지로 과학기술의 발전과 더불어 급속히 변화하는 산업 생태계 속 에서 전력시스템 또한 변화에 맞춰 고품질 전력 공급을 위한 계통 최적 화를 위한 변화가 수반되어야함을 염두해야 할 것이다.

본 연구가 기존 배전계통 등가모델에 대한 적절성을 평가하고 최적화 된 배전계통 등가모델에 대해 재검토와 더불어 23kV FACTS 설비 개 발에 대한 연구를 위한 단초가 되기를 기대한다.

참고문 헌

- [1] "전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준" 산업통상자원부 고시
 제 2015-112회, 2015
- [2] J. Duncan Glover, "Power System Analysis & Design" 6th Edition ,pp458-472
- [3] J.-H. Choi, J.-C. Kim "The online voltage control of ULTC Transformer for distribution voltage regulation", Volume 23, 2001, pp91-98,
- [4] 이현옥, 허재선, 김병기, 노대석, 김재철, "분산전원이 연계된 배전 계통에 있어서 선로전압 조정장치(SVR)의 전압제어 개선방안",
 전기학회논문지, pp. 224-229, 2014
- [5] Milan S. Calovic, "Modeling and Analysis of under load Tap changing Transformer control systems", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 7, July 1984
- [6] 이우리, "분산전원이 도입된 배전계통의 전압제어기기 설치계획", 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사학위논문, 2013
- [7] 한국전력공사, "변전소 운영업무 기준", 11차 개정, 2017
- [8] P. Kunder, "Power System Stability and Control", pp. 629-633
- [9] 전재근, 원동준, 김태현, "분산전원이 연계된 배전계통에서 ULTC
 와 분산전원의 전압제어", 전기학회논문지 63(2), 2014.2,
 pp.224-229
- [10] H.Y. Li, H. Leite, "Increasing Distributed Generation Using Automatic Voltage Reference Setting Technique", 2008
- [11] Yashodhan P. Agalgaonkar, Bikash C. Pal, Rabih A. Jabr "Distribution Voltage Control Considering the Impact of PV Generation on Tap Changers and Autonomous Regulators", IEEE Transactions on Power Systems, VOL. 29, 2014
- [12] W. H. Kersting, "Distribution Feeder Voltage Regulation Control", 2009
- [13] 한국전력공사, "전력용 변압기 선정기준", 2013년 개정
- [14] 황인규, 김영주, 이완석, "배전계통 진상 무효전력 증가에 따른 154kV 변전소 전압제어의 문제점과 대책에 관한 연구", 대한전기 학회 학술대회 논문집, 2019.7, pp. 535-536
- [15] 한국전력공사, "대용량 배전에 관한 연구(최종보고서)", 1991년
- [16] Harry Orton, "History of Underground Power Cables", 2013년
- [17] R Bergen, "Power Systems Analysis", pp. 90-112
- [18] James McCray, "Flexible AC Transmission Systems Global Market Analysis and Forecasts", pp. 64-66, 2014

Abstract

A Study on impact Transformer and Distribution network due to the increase of underground cables at Distribution Power system.

Wan Seok, Lee Department of Engineering Practice Graduate School of Engineering Practice Seoul National University

In domestic power systems, the voltage regulation target of the distribution system is divided into light load, heavy load, and peak load according to the amount of load, and is operated by setting a voltage range of 22.0kV to 23.9kV. 154kV ULTC turn ratio control, SVR turn ratio control, and Shunt Capacitor control are generally applied and operated in order to comply with the distribution system voltage maintenance range and to supply high quality power by stabilizing the low-voltage side customer voltage. The ULTC and SVR turn ratio control compensates for the voltage drop through the magnitude of the load current and the series impedance R and L line constants of the distribution line through LDC (Line Drop Compensation) logic.

Shunt Capacitor control compensates voltage through power factor control by supplying capacitive reactive power to compensate for inductive reactive power generated by the load. In conclusion, the voltage compensation methods mainly applied in the current distribution system are systems developed for the purpose of raising the voltage to compensate for the voltage drop caused by load fluctuations. Such a distribution line voltage compensation method would not have had a great difficulty in maintaining voltage in the past when distribution systems were constructed mainly on overhead lines.

However, if the configuration of the distribution system is changed and a situation in which parallel admittance components must be considered in addition to the series impedance component, more precisely, the line capacitance component must be considered, the problem of the voltage control method that we now standardize will be revealed. There won't be.

Underground power cables have a physical structure and characteristics in which pressurized conductors are not exposed to the outside, and are advantageous in weather changes such as typhoons and lightning compared to overhead lines. In addition, since there is no equipment exposed on the ground, the risk of electric shock is low, it is advantageous in terms of urban aesthetics, and very little cost is required for maintenance and inspection after construction. With these advantages. the underground distribution system, which began in 1929 between Dangin-ri-Yeongdeungpo, Ahyeon-dong, and Sunhwa-dong, is accelerating to a point where the centralization rate in metropolitan cities exceeds 50%.

As the underground conversion rate of distribution lines increases, there are cases in which the distribution lines drawn from the 154kV voltage transformer consist of more than 90% underground. In this case, it is impossible to maintain a stable voltage and even predict the voltage change by only the conventional distribution line compensation method that considers only the direct impedance of the line and the voltage drop due to the load change. The capacitive reactive power loss of the peripheral voltage increases due to the capacitance component generated by the dielectric of the underground cable, which was previously concerned, and the power factor is lowering due to it.

This research report was initiated by discovering the phenomena of increasing reactive power, lowering the power factor, and changing the voltage of the distribution system in the peripheral voltage operating in the new urban area. The hypothesis that this phenomenon is due to the cause of the distribution system undergroundization that expands with urbanization and industrialization is established, and the process of verifying the hypothesis through actual power system data and theoretical analysis is included. In the case study, the validity and logic of the research result were verified by constructing an equivalent model using actual distribution system data and verifying the hypothesis of this research project using a simulation tool.

Keywords : Distribution line, Power system reference voltage, Underground cable, Capacitance, Reactive power Student Number : 2019-24844