

IT기반 분산전원 연계 배전계통의 최적전압조정에 관한 연구

論 文
55A-4-1

A study for IT Based Optimal Voltage Control Method of Distribution Systems with Distributed Generation

徐圭錫[†] · 金定年^{*} · 白榮植^{**}
(Gyu-Seok Seo · Jung-Nyun Kim · Young-Sik Baek)

Abstract - Recently, standard of living improved and Information-Communication industry developed rapidly. Thereby, interest about electric power quality is rising worldwide. So, research and Development to enhance electric power quality in various viewpoint until most suitable supply system from each kind device to improve electric power quality. And specially, interest about voltage quality is rising by diffusion increase of information communication appliance and minuteness control appliance etc. Also Power consumption is increasing, but expansion of large size generator by environmental and site security problem is difficult. So, introduction of distribution generation is investigated actively by electric-power industry reorganization. Voltage management of power system had been controlled by ULTC (Under Load Tap Changer) in substation and pole transformer on the high voltage distribution line. But, voltage control device on substation and distribution line is applied each other separatively. Therefore, efficiency of line voltage control equipment is dropping. Also, research about introduction upper limit of distribution generation is consisting continuously. This paper presents cooperation use way between voltage control device and introduction upper limit of distribution generation for most suitable voltage control in distribution power system.

Key Words : Distribution Power Systems, DAS(Distribution Automation System), Distflow, ULTC, Voltage Control

1. 서 론

배전계통 자동화란 원거리에서 설치되어 있는 배전설비를 원격에서 감시 제어하고, 배전선로의 고장을 인지하여 자동으로 처리하고, 취득 데이터를 이용하여 배전계통을 최적 운영하는 기술을 말한다. 이러한 배전계통 자동화를 구현하기 위한 구성 설비로서는 그림 1에서 볼 수 있는 중앙제어장치, 통신장치, 통신망(유선, 무선), 단말장치(FRTU), 개폐장치 등이 필요하고, 모든 구성 설비가 구현되면 배전계통 각 노드별 전압 데이터를 취득 가능하게 될 것이다.

국내의 경우 배전계통을 살펴보면 고압부가 배전 계통 자동화 대상으로서 현재로는 전 계통 내 모든 전압 데이터를 취득 할 수 없지만, 2005년 현재 배전 자동화 망 구축을 위한 광 전송로 포설 작업 중에 있고, 디지털 계량 장치(GIPAM : Digital Integrated Protection And Monitoring Equipment)와 디지털 전력 보호 장치(GIMAC : Digital Integrated Meter) 등의 설비가 동시에 보급되어 진다면 가까운 미래에 원하는 데이터를 취득 할 수 있을 것이다. 또한 배전 계통 내 모든 노드가 아닌 중요도가 높은 노드에 우선적으로 설치가 된다 하더라도 기존에 연구 되어진 상태추론 등의 기법을 적용하여

거의 모든 부분의 데이터를 취득 가능 하다고 볼 수 있을 것이다.

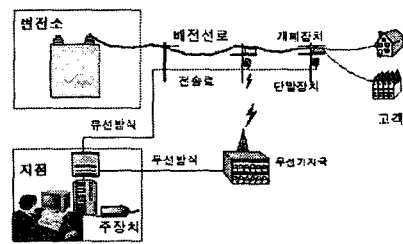


그림 1 배전계통 자동화 구성 설비
Fig. 1 Composition equipment of DAS

본 논문에서는 이러한 방식으로 취득 되어진 데이터를 이용하여 실제 계통에서 전압 유지를 하기 위한 연구 내용에 대하여 기술 하였다.

실제 경부하 상태로 정상적인 전압을 유지하며 운용되던 배전계통에서 특정 피더에 중부하가 걸렸을 경우 해당 피더의 노드 중 허용치 전압 범위를 넘어서게 되는 경우가 발생하게 될 것이고, 이와 반대의 경우도 생각해 볼 수가 있다. 이를 올바른 허용치 범위 내로 들게 하기 위해서는 배전계통에 포함된 여러 가지 설비를 컨트롤 하여야 한다. 이러한 설비들을 컨트롤하는데 있어 최적의 해에 접근하는 방법을 제시하였고, IT(Information Technology)기반 배전계통 자동화 시스템(DAS : Distribution Automation System)과 SCADA

† 교신저자, 正會員 : 경북대학교 공대 전기공학과 박사과정
E-mail : kikedang@nate.com

* 正會員 : LS전선(주) 전력연구소, 초고압그룹

** 正會員 : 경북대학교 공대 전자전기공학부, 정교수

接受日字 : 2005年 12月 16日
最終完了 : 2006年 3月 23日

시스템을 연계하여 시뮬레이션 하기위하여 자체 개발한 HMI (Human-Machine Interface)의 구성에 대하여 살펴보도록 한다.

2. 본 론

2.1 배전계통의 모델

그림 2에 제시된 두 개의 변압기, 하나의 분산전원을 포함하고 있는 배전계통의 모델을 시뮬레이션 대상으로 삼아 배전계통 조류계산(Distflow)을 사용함으로써 그림 3의 전압 결과를 얻을 수 있었다.

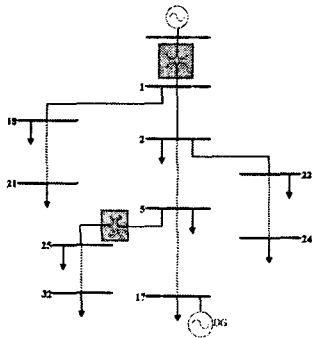


그림 2 배전계통 모델
Fig. 2 Model of distribution power system

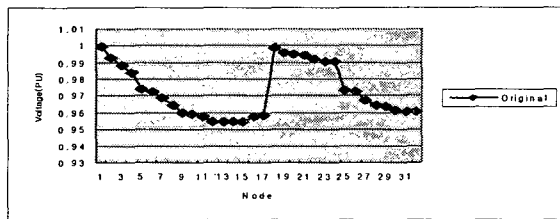


그림 3 배전계통 해석 결과
Fig. 3 Analysis result of distribution power system

배전계통 모델의 주변압기 1차측 전압은 $1.0 \angle 0^\circ$ 로 일정하게 유지되는 것으로 하였고, 각 변압기의 Tap step당 비율은 0.00625pu로 17step을 사용하였다. 또한 분산전원 무효전력의 최대 투입량은 해당모선 전압(Node 17)의 허용치 전압(1.05pu)을 넘지 않는 2.7MVar를 상한으로 하였다. 위의 모델에서는 모든 전압이 허용치전압 (0.95pu~1.03pu) 사이에 유지 될 수 있도록 기본적으로 분산전원 측에서 무효전력 450kVar을 공급하는 것으로 시뮬레이션 하였다. 이로써 모든 노드의 허용치전압이 잘 유지되고 있음을 볼 수 있다.

2.2 Distflow

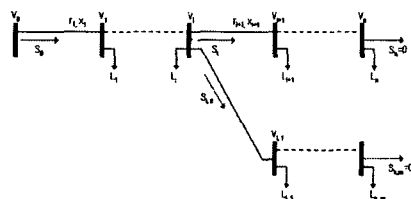


그림 4 방사상 배전계통
Fig. 4 Radial distribution power system

배전계통 조류계산은 아래에 주어진 바와 같이 Distflow Branch Equation이라는 반복적인 연산식을 사용하여 해를 구한다.

$$S_i = S_{0,0} - S_{loss1} - S_{Li} = S_{0,0} - z_1 \frac{|S_{0,0}|^2}{V_0^2} - S_{Li}$$

$$V_i = V_0 - z_1 I_0 = V_0 - z_1 \frac{S_{0,0}^*}{V_0^2}$$

$$P_{i+1} = P_i - r_{i+1} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - P_{Li+1}$$

$$Q_{i+1} = Q_i - x_{i+1} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - Q_{Li+1}$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_{i+1}P_i + x_{i+1}Q_i) + (r_{i+1}^2 + x_{i+1}^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2}$$

$$x_{0,i+1} = f_{0,i+1}(x_{0,i}) \quad i = 0, 1, \dots, n-1$$

where $x_{0,i} = [P_i \quad Q_i \quad V_i^2]^T$

Boundary Conditions

$$P_n = 0$$

$$Q_n = 0$$

$$V_0 = V_0^{set}$$

이 방법은 첫 번째 노드에서 P_0, Q_0, V_0 는 알고 있는 값이라면 이하의 다른 노드에서 전압과 유출 전력을 순차적으로 구할 수 있다는 것을 의미한다. 즉, 변전소의 송출전압과 공급전력을 알고 있다면 이하의 모든 노드의 전압과 선로에서의 조류를 계산할 수 있다. 수렴 판정은 중단 노드에서의 전력 편차가 허용 오차 내로 들어오면 중단 하는 것으로 한다.

2.2.1 ULTC의 적용

변압기를 주변압기 2차측에 연결되어 있는 피더들과 직접 연결 불가능하기 때문에 ULTC 변압기를 그림 5에서 보는 바와 같이 π -등가회로로 변경하여 적용하도록 한다.

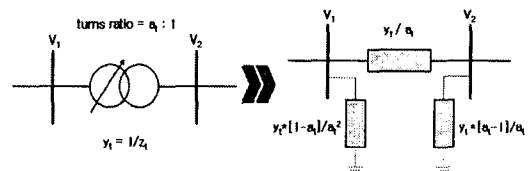


그림 5 ULTC의 Distflow 적용
Fig. 5 Application of ULTC to Distflow

$$\frac{V_{in}}{V_{out}} = \frac{N + k\Delta N}{n} = \frac{N}{n} + \frac{k\Delta N}{n}$$

$$= \text{nominal turns ratio} + \frac{k\Delta N}{n}$$

$$a_t = \frac{\frac{V_{in}}{V_{out}}}{\text{nominal turns ratio}} = 1 + k \frac{\Delta N}{N}$$

그림 5에서의 우측 그림과 같이 ULTC를 등가모델로 해석하여 계통에 적용한다. 예를 들어 V_1 측을 보면 $(V_1)^2$ 와 같이 적용하여 Distflow에 반영한다.

2.2.2 분산전원의 적용

전력계통의 조류해석에 있어서 발전기들은 시스템 전압을 일정하게 유지가 가능한 P-V 노드 또는 시스템의 전압을 추종하며 정역률, 정출력 운전을 하는 P-Q노드로 처리된다. 그러나, 배전계통에 도입되는 분산전원은 연계점의 전압을 일정하게 유지할 수 있을 정도로 큰 용량을 갖지 않고 또한, 제어기도 대부분이 정역률, 정출력 운전을 하도록 설계되어 있다. 따라서, 분산전원을 P-V노드가 아닌 P-Q노드로 처리하였다. 즉, 분산전원은 부의 특성을 갖는 정전력 부하로 고려될 수 있다.

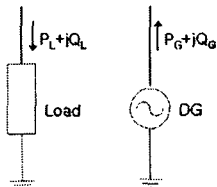


그림 6 분산전원의 Distflow 적용
Fig. 6 Application of distribution generation to Distflow

이와 같이 고려되어진 Distflow의 전압 결과는 표 1에서 보듯이 계통 해석 툴인 EDSA의 전압 결과값과 거의 동일하게 얻어졌으며, 이로서 Distflow로 얻을 수 있는 결과값에 대한 신뢰성이 있다고 볼 수 있다.

표 1 EDSA와 Distflow의 전압 결과값 비교
Table 1 Voltage result value comparison of EDSA and Distflow

Node	EDSA	Distflow	Error
1	0.9981	0.998815	-0.00072
2	0.984	0.984759	-0.00076
3	0.9765	0.9773	-0.0008
4	0.9692	0.969925	-0.00072
5	0.9598	0.95158	-0.00078
6	0.9473	0.948102	-0.0008
7	0.9425	0.943268	-0.00077
8	0.9362	0.937012	-0.00081
9	0.9304	0.93121	-0.00081
10	0.9296	0.930352	-0.00075
11	0.9281	0.928855	-0.00075
12	0.922	0.922755	-0.00075
13	0.9197	0.920494	-0.00079
14	0.9183	0.919084	-0.00078
15	0.9169	0.917719	-0.00082
16	0.9149	0.915697	-0.0008
17	0.9143	0.915091	-0.00079
18	0.9976	0.998287	-0.00069
19	0.994	0.994716	-0.00072
20	0.9933	0.994013	-0.00071
21	0.9927	0.993377	-0.00069
22	0.9804	0.98118	-0.00078
23	0.9738	0.974521	-0.00072
24	0.9704	0.971208	-0.0008
25	0.95	0.951069	-0.00107
26	0.9474	0.94815	-0.00112
27	0.936	0.937118	-0.00112
28	0.9278	0.928931	-0.00113
29	0.9243	0.925387	-0.00109
30	0.9201	0.921241	-0.00114
31	0.9192	0.920329	-0.00113
32	0.9189	0.920047	-0.00115

2.3 배전계통 내 노드의 허용전압 범위 위배 시 각 설비의 최적 컨트롤

지금까지 설명된 내용을 바탕으로 배전계통 내 임의의 피더에 중부하가 걸렸을 경우 각 설비별로 컨트롤 하는 방법에 대하여 생각해 봐야 한다. 따라서 그림 2번의 모델에서

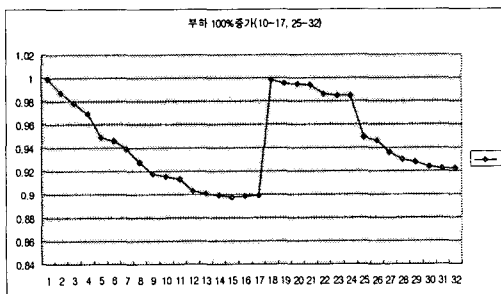


그림 7 증가된 부하에서의 전압 결과
Fig. 7 Voltage result on heavy loading

노드 10~17, 노드 25~32의 부하량을 100% 증가시켜 시뮬레이션 하였고, 그림 7에서와 같은 전압 결과를 얻을 수 있었다.

그림 7에서 볼 수 있듯이 부하가 증가함에 따라 허용전압 범위를 벗어난 노드가 상당히 발생했음을 알 수 있다(최저전압 발생 모션 → Node 15 : 0.897641pu, 최고전압 발생 모션 → Node 1 : 0.999304pu). 이들의 전압을 허용범위 내에 들도록 하기 위해서는 해당 배전계통 내의 컨트롤이 가능한 설비들을 조작하여야 하는데, 이때 이 설비들이 최적으로 컨트롤 될 수 있는 방법에 대하여 알아보도록 한다.

아래의 식에서는 허용전압 위배모션 발생 시 최고/최저전압 노드에서 각 컨트롤 설비의 단위 step 변화에 따른 영향을 변화율로 나타낸 변수를 볼 수 있다. 예를 들어, B라는 변수는 변압기에서 현재 유지되고 있는 Tap을 기준으로 1 step 변화 시켰을 때 최저전압 모션에 끼치는 영향을 나타내고, 분산전원에서의 1 step은 변압기가 1 step변화하였을 때 해당 2차 측 모션에 영향을 주는 만큼의 양에 기인하여 단계를 나누었다. 본 논문의 시뮬레이션에서는 각 단계별 무효전력 공급량을 150kVar로 두었다.

목적식은 각 설비별 컨트롤을 가장 최소로 컨트롤 하겠다는 의미를 지닌다. 제약식은 최고/최저전압 모션의 전압 유지범위, 그리고 각 설비별로 컨트롤 될 수 있는 상/하한치를 규정하는 역할을 한다.

-변수 정의-

- A : <최저전압 모션>분산전원의 출력량에 대한 변화율(%)
- B : <최저전압 모션>Main Tap의 변화에 대한 변화율(%)
- C : <최저전압 모션>2nd Tap의 변화에 대한 변화율(%)

- A' : <최고전압 모션>분산전원의 출력량에 대한 변화율(%)
- B' : <최고전압 모션>Main Tap의 변화에 대한 변화율(%)
- C' : <최고전압 모션>2nd Tap의 변화에 대한 변화율(%)

- X₁ : 계통에 적용 될 분산전원의 출력량
- X₂ : 계통에 적용 될 Main Tap의 Step
- X₃ : 계통에 적용 될 2nd Tap의 Step

제약식

$$\begin{aligned} \min \text{Voltage}(\%) &\leq \text{Low_Current Voltage}(\%) + Ax_1 + Bx_2 + Cx_3 \leq \text{MAX Voltage}(\%) \\ \min \text{Voltage}(\%) &\leq \text{High_Current Voltage}(\%) + A'x_1 + B'x_2 + C'x_3 \leq \text{MAX Voltage}(\%) \end{aligned}$$

분산전원 출력량의 하한치 $\leq x_1 \leq$ 분산전원 출력량의 상한치
Tap의 Step 하한치 $\leq x_2 \leq$ Tap의 Step 상한치
Tap의 Step 하한치 $\leq x_3 \leq$ Tap의 Step 상한치

목적식

$$\min F(x) = x_1^2 + x_2^2$$

위의 식은 수치해석 패키지 IMSL(Interntional Mathematical and Statistical Library)이 제공하는 min_con_gen_lin 알고리즘을 이용하여 실제 구현하였고, 이로서 해당 모델 계통의 데이터를 이용하여 제시된 수식으로부터 그림 8에서 볼 수 있는 해를 얻었다. 이로서 다음의 결과를 얻을 수 있다.

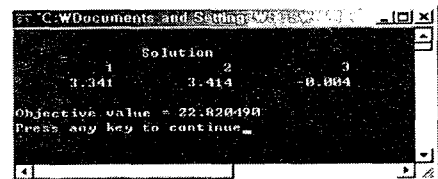


그림 8 목적식의 해
Fig. 8 Solution of objective equation

위 식의 해를 살펴 보면
 분산전원의 출력량 : $3.341 \times 150 = +501.15 \text{ kVar}$
 Main TR Tap : 3.414 = +3 Step(반올림 처리)
 2nd TR Tap : -0.004 = 0 Step(반올림 처리) 의 의미를 가진다는 것을 알 수 있다.

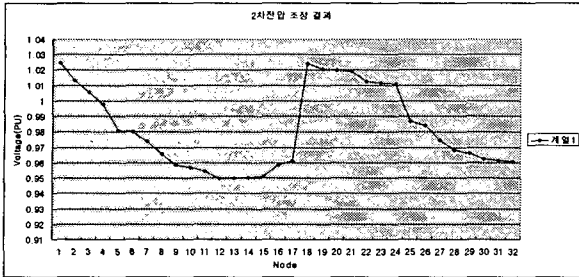


그림 9 2차 전압 조정 결과
 Fig. 9 Result of 2nd voltage control

분산전원은 실제 운용시 각 Step별로 적용할 필요가 없기 때문에 실제 구해진 해의 실수값을 적용하여 출력량을 조정하고, 변압기의 Tap은 정수값을 필요로 하기 때문에 반올림 처리하여 각 Step을 결정하여 주었다.

위의 과정을 2회에 걸쳐 반복적으로 적용을 함으로서 그림 9에서 보는바와 같은 결과를 얻을 수 있었고, 거의 모든 노드에서의 전압이 허용치 범위 내에 들어왔다는 것을 볼 수 있다.

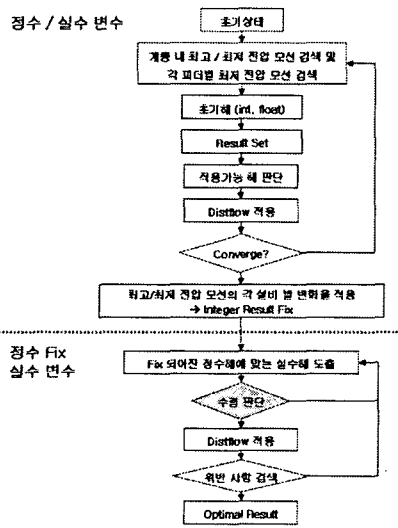


그림 10 최적해를 위한 알고리즘
 Fig. 10 Algorithm for optimal result

그림 10은 최적해를 위한 알고리즘이다. 앞서 설명한 바와 같이 최고 / 최저 전압 모션 및 각 피더별 최저전압 모션의 Control factor별 변화율 계산하여 초기해를 구한다. 분산전원의 경우에는 실수의 해를 바로 적용 가능하지만 Tap의 경우에는 실수해 자체를 바로 적용 불가능하기 때문에 정수로 변환하여야 함으로 다수개의 해가 나타난다. 이들의 해중에서 가장 적합한 해를 구하기 위하여 점진 이하의 부분이 추가되어 정수를 고정시킨 상태에서 좀 더 개선된 실수 해를 구하게 되며 이로서 가장 최적 상태의 해를 얻을 수 있다.

2.4 Network의 구성 및 HMI

본 논문에서 제안한 각 설비별 최적 컨트롤 값을 실제 계통에 적용하기 위한 시스템의 개요도를 그림 11에 나타내었다. 계통 내 허용전압 위반 발생 시 배전계통에서 받아들인 각각의 데이터를 이용하여 Distflow Engine에서 최적의 해를 구하고, 그것을 다시 배전계통 내 컨트롤 설비에 적용함으로써 배전계통 내 전압을 허용전압 내에서 운용할 수 있다.

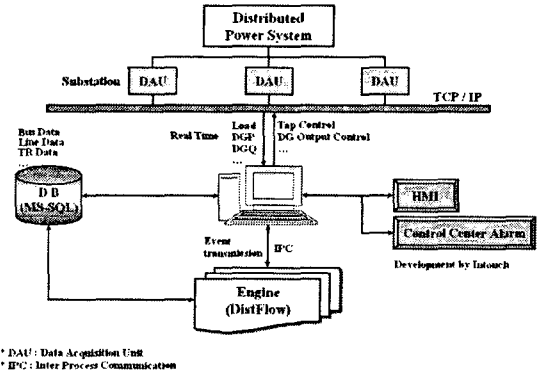


그림 11 배전계통 자동화 시스템 개요도
 Fig. 11 Configuration of DAS

그림 11의 내용을 바탕으로 HMI 개발 툴인 Intouch를 사용하여 구현하였고, Intouch는 아래의 그림 12, 그림 13의 내용을 기반으로 작성 된다.

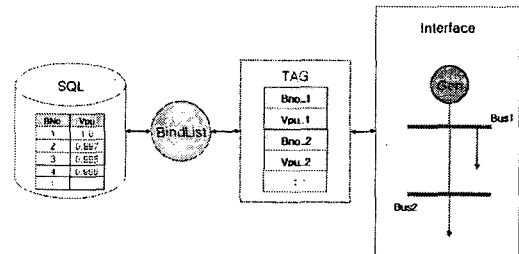


그림 12 Intouch와 SQL DB와의 연계
 Fig. 12 Connection of Intouch and SQL DB

그림 12에서는 실제 인터페이스와 SQL DB가 연계되는 내부 구조를 보여준다. 인터페이스에서 구현되는 모든 설비는 TAG로 표현이 되고, 구현된 TAG는 BindList라는 장치로서 SQL DB와 연결되어 데이터를 공유하게 된다.

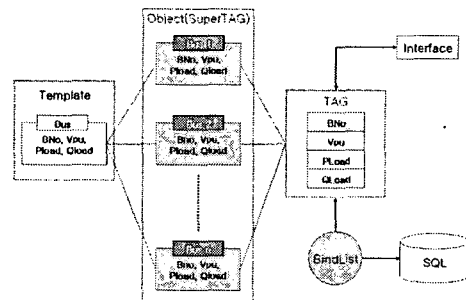


그림 13 Intouch에서의 OOP
 Fig. 13 OOP in Intouch

이와 같은 구조를 확장하여 보면 그림 13와 같은 전체 구조를 가지게 되는데 이는 OOP(Object Oriented Programming)기법을 기반으로 구현한다. 하나의 설비가 있다면 이를 Template으로 만들어 놓고 이로부터 생성된 각각의 Object에 번호를 부여하여 시스템에 존재하는 다수의 설비를 생성해낸다. 이를 그림 11에서 설명한 바와 같이 SQL DB와 연계하여 모든 구성을 완성한다.

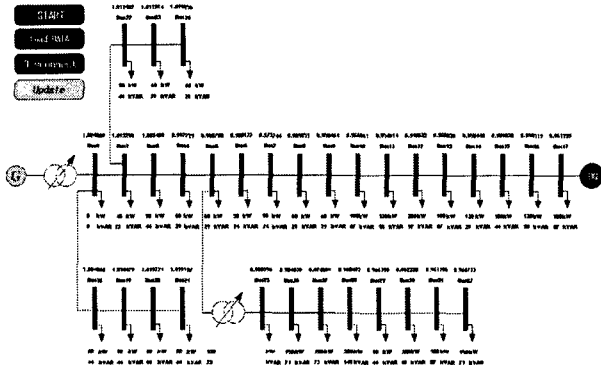


그림 14 Intouch로 구현한 HMI
Fig. 14 Realization of HMI by Intouch

그림 14에서는 위의 그림 12, 그림 13에서 설명한 개념을 바탕으로 배전계통 자동화에 적용 되어질 수 있는 HMI를 구현하였으며 이를 이용하여 실제 배전계통과 연계할 수 있게 되어진다. 또한 현재의 배전계통 내 상황을 계통 운영자가 쉽게 판단 할 수 있게 도와줄 수 있을 것으로 보여 진다.

3. 결 론

본 논문에서는 배전전압조정을 위해 계통 내 설비에 대한 최적 컨트롤의 해를 구하는 새로운 방법을 제안하였다. 향후 모든 배전계통 내 각 설비들에 대한 자동화가 이루어진다면 제안된 분산전원이 연계된 배전계통의 최적 컨트롤 방법으로서 좀 더 빠른 시간 안에 각 설비들의 최적조건을 충족시키는 해를 구해 낼 수 있을 것이고, 실 계통에 적용 또한 가능할 것이다.

참 고 문 헌

[1] 김정년, “배전계통 최적구성과 정전복구”, 경북대학교, pp. 25-31, 2000.
 [2] 김태웅, 김재언 “배전계통에 도입되는 분산전원의 운전 가능범위결정에 관한 연구” 대한전기학회 논문지 51권, 제2호, pp. 93-101, 2002, 2
 [3] 김태웅, 김재언 “분산전원이 도입된 배전계통의 전압 해석 방법에 관한 연구” 대한전기학회 논문지 제52권, 제2호, pp. 69-78, 2003, 2

[4] Joon-Ho Choi, Jae-Chul Kim : Advanced Voltage Regulation Method of Power Distribution Systems Interconnected with Dispersed Storage and Generation Systems, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No. 2, pp. 329-334, April 2001
 [5] M.E.Baran, F.F.Wu, “Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, January 1989.

저 자 소 개



서 규 석 (徐圭錫)

1975년 11월 4일생. 2003년 경북대학교 공대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : (053)940-8802
 E-mail : kikidang@nate.com



김 정 년 (金定年)

1969년 2월 21일생. 1994년 경북대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1998년~현재 LS전선(주) 전력연구소 재직

Tel : (054)469-7627
 E-mail : jnkim@cable.lg.co.kr



백 영 식 (白榮植)

1950년 7월 8일생. 1974년 서울대 전기공학과 졸업. 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1977년 명지대 전기공학과 조교수. 현재 경북대 전자전기공학부 교수.

Tel : (053)950-5602
 E-mail : ysbaek@mail.knu.ac.kr